

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
INFORMÁTICA Y MECÁNICA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA



TESIS

**PROYECTO MINICENTRAL HIDROELÉCTRICA DE URPAY DE
100 KW, UTILIZANDO BOMBA COMO TURBINA, CON FINES
AGRO INDUSTRIALES, HUARO-CUSCO**

PRESENTADO POR:

Br. GIMENA CASTILLO PINARES

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO MECÁNICO**

ASESOR:

Dr. EDGAR ALFREDO CATACORA ACEVEDO

CUSCO – PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor DR. EDGAR ALFREDO CATAORA ACEVEDO
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: PROYECTO MINICENTRAL HIDROELECTRICA
DE URPAY DE 100 KW, UTILIZANDO BOMBA COMO TURBINA, CON FINES
AGRO INDUSTRIALES HUARO-CUSCO.

Presentado por: GIMENA CASTILLO PINARES DNI N° 70054661;
presentado por: DNI N°:
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO MECANICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de
Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 8%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	<u>X</u>
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto**
las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 01 de JULIO de 2026


Firma

Post firma DR. EDGAR ALFREDO CATAORA ACEVEDO

Nro. de DNI 23983057

ORCID del Asesor 0000-0001-6182-9814

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 27259-604018996

Gimena Castillo Pinares

Tesis-Gimena Castillo Pinares.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:604018996

Fecha de entrega

1 jul 2026, 10:21 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

1 jul 2026, 10:26 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

Tesis-Gimena Castillo Pinares.pdf

Tamaño del archivo

6.7 MB

190 páginas

38.766 palabras

221.702 caracteres

8% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 25 palabras)
- Base de datos de Crossref
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

Fuentes principales

- 8%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 2%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



PRESENTACIÓN

Señor:

Decano de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Informática y Mecánica.

Distinguidos docentes integrantes del jurado.

De acuerdo con las disposiciones del Reglamento de Grados y Títulos actualmente vigente en nuestra universidad, y como parte del proceso para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico, pongo a consideración el Trabajo de Investigación de Desarrollo Tecnológico titulado:

“PROYECTO MINICENTRAL HIDROELÉCTRICA DE URPAY DE 100 KW, UTILIZANDO BOMBA COMO TURBINA, CON FINES AGRO INDUSTRIALES, HUARO-CUSCO”.

El estudio de la mini central hidroeléctrica, se desarrolló en la comunidad de Urpay del distrito de Huaro para generar energía eléctrica, se utilizará una bomba que será usada como turbina hidráulica para exclusivo de los pobladores y a su vez del procesamiento de maíz.

Bach. Gimena Castillo Pinares.



DEDICATORIA

Dedico esta investigación a Dios, el cual me dio las fuerzas necesarias para lograr mis metas y aprendí a realizarlas con amor, pasión y empatía.

A mi querida madre Sonia por su apoyo y amor incondicional, enseñarme que somos capaces de lograr nuestras metas y a tener siempre presente los valores en todo momento de la vida.

A mis hermanas Melina y Melissa, mis sobrinos Santiago y Zabdiel por brindarme comprensión y demostrarme las personas valiosas que son.

Bach. Gimena Castillo Pinares.



AGRADECIMIENTOS

Mi gratitud a Dios, quien me ha dado salud, ha dirigido mis pasos y me ha permitido realizar cada una de mis metas. Su presencia ha sido mi mayor fortaleza y fuente de inspiración.

También agradezco la oportunidad de haber conocido a grandes personas que, con sus palabras, experiencias, consejos y enseñanzas, han complementado y enriquecido mi formación.

A mi madre y a mi familia, por su apoyo incondicional, amor y confianza en cada momento de este camino. Su respaldo ha sido fundamental para alcanzar mis logros.

A mi asesor por compartir conmigo sus conocimientos y sobre todo tenerme paciencia para completar esta meta.

Bach. Gimena Castillo Pinares.



INTRODUCCIÓN

El trabajo de investigación y desarrollo tecnológico expuesto en esta tesis se orienta a proponer una opción de generación energética que ha demostrado ser muy utilizada en numerosos países en desarrollo y que, en comparación con los métodos tradicionales, presenta una mayor viabilidad.

En el capítulo I, Generalidades establece el contexto general del estudio, Se presenta la caracterización de la zona de estudio, el planteamiento del problema, la justificación, los objetivos, las hipótesis y la metodología de investigación.

En el capítulo II, Marco Teórico se desarrollan los fundamentos teóricos necesarios para comprender el funcionamiento de las centrales hidroeléctricas, las turbomáquinas hidráulicas y, en particular, las bombas centrífugas operando como turbinas.

El capítulo III, Análisis de la Demanda de Energía analiza la demanda energética asociada a la planta agroindustrial propuesta para la transformación del maíz en la localidad de Urpay. A partir de esta información, se determinan los diagramas de carga y el factor de carga, estableciendo la potencia y energía necesarias que justifican el dimensionamiento de la minicentral hidroeléctrica.

En el capítulo IV, Obras Mecánicas de la M.C.H. Urpay se desarrolla el diseño y dimensionamiento de las obras mecánicas e hidráulicas de la minicentral hidroeléctrica, con énfasis en la tubería forzada y la selección de la bomba como turbina.

En el capítulo V, Grupo Hidroeléctrico y Especificaciones Técnicas se describen los componentes del grupo hidroeléctrico seleccionado, además se detallan las especificaciones técnicas y normas aplicables. El capítulo consolida la propuesta electromecánica del proyecto, integrando los resultados de los capítulos previos.

En el capítulo VI, Análisis Económico se evalúa la viabilidad económica y financiera del proyecto Minicentral Hidroeléctrica Urpay, destinada al suministro de energía eléctrica a una



planta agroindustrial. El análisis considera los costos de inversión, operación y mantenimiento, con el fin de determinar la rentabilidad y conveniencia del proyecto.

La tesis culmina presentando las conclusiones, recomendaciones, anexos y planos.



RESUMEN

La presente tesis desarrolla el proyecto de una minicentral hidroeléctrica de 100 kW en la comunidad de Urpay, distrito de Huaro, Cusco, utilizando bombas centrífugas operando como turbinas (PAT) como alternativa tecnológica de generación eléctrica. El objetivo principal es abastecer de energía a una planta agroindustrial dedicada al procesamiento de maíz, promoviendo el desarrollo socioeconómico local mediante el aprovechamiento sostenible del recurso hídrico.

El estudio inicia con el análisis del contexto geográfico, social y energético de la zona, así como la revisión del estado del arte sobre el uso de PAT en minicentrales hidroeléctricas. Posteriormente, se desarrollan los fundamentos teóricos de las turbomáquinas hidráulicas y se analiza la demanda energética de la planta agroindustrial, determinando la potencia requerida y los perfiles de carga.

Se realiza el dimensionamiento hidráulico y mecánico de la tubería forzada y se evalúan distintos escenarios de operación para la selección de la bomba adecuada en modo turbina, aplicando metodologías reconocidas y correlaciones empíricas. Finalmente, se definen las especificaciones del grupo hidroeléctrico, incluyendo el generador asíncrono y los sistemas de control.

Los resultados demuestran que el uso de bombas como turbinas constituye una solución técnica y económicamente viable para minicentrales hidroeléctricas de pequeña potencia, permitiendo la recuperación de infraestructuras existentes, la reducción de costos de inversión y la generación de energía limpia, confiable y sostenible para aplicaciones agroindustriales.

Palabras clave: Bomba como turbina (PAT), Mini central hidroeléctrica, Generación distribuida, Tubería forzada.



ABSTRACT

This thesis develops the design of a 100 kW mini hydroelectric power plant located in the community of Urpay, district of Huaro, Cusco, using centrifugal pumps operating as turbines (PAT) as an alternative technology for electrical power generation. The main objective is to supply energy to an agro-industrial plant dedicated to maize processing, promoting local socioeconomic development through the sustainable use of water resources.

The study begins with an analysis of the geographical, social, and energy context of the area, along with a review of the state of the art regarding the application of PATs in mini hydroelectric power plants. Subsequently, the theoretical fundamentals of hydraulic turbomachinery are presented, and the energy demand of the agro-industrial plant is analyzed to determine the required power and load profiles.

Hydraulic and mechanical sizing of the penstock is carried out, and different operating scenarios are evaluated for the selection of a suitable pump operating in turbine mode, applying recognized methodologies and empirical correlations. Finally, the specifications of the hydroelectric generating unit are defined, including the asynchronous generator and the control systems.

The results demonstrate that the use of pumps as turbines represents a technically and economically viable solution for small-scale hydroelectric power plants, enabling the recovery of existing infrastructure, reducing investment costs, and providing clean, reliable, and sustainable energy for agro-industrial applications.

Keywords: Pump-as-turbine (PAT), Small-scale hydroelectric power plant, Distributed generation, Penstock.



NOMENCLATURAS Y SÍMBOLOS

Hb	Altura bruta	m
Hn	Altura neta	m
Ht	Altura neta disponible	m
Hx	Altura máxima considerando golpe de ariete	m
hmax	Altura dinámica (sobrecarga por golpe de ariete)	mca
Hd	Altura dinámica	m
Hmax	Altura total en operación	m
Hp	Altura en modo bomba	m
HT,BEP	Altura en BEP modo turbina	m
HB,BEP	Altura en BEP modo bomba	m
Hnt	Altura en modo turbina a velocidad Nt	m
Lb / Lt	Longitud del tramo	m
Lta	Longitud acumulada	m
Q	Caudal	m ³ /s
Qd	Caudal de diseño	m ³ /s
Qt	Caudal por turbina	m ³ /s
Qp	Caudal en modo bomba	m ³ /s
QT,BEP	Caudal en BEP modo turbina	m ³ /s
QB,BEP	Caudal en BEP modo bomba	m ³ /s
CQ	Factor de conversión de caudal	—
CH	Factor de conversión de altura	—



ρ	Peso específico del agua / densidad	kg/m ³
g	Aceleración de la gravedad	m/s ²
a	Celeridad del sonido en el agua	m/s
ξ	Módulo de compresibilidad del agua	kg/mm ²
E	Módulo de elasticidad del acero	kg/mm ²
d	Densidad del acero	kg/m ³
cd	Coefficiente de dilatación térmica	m/m·°C
T_m	Temperatura de diseño	°C
ν (ν)	Viscosidad cinemática del agua	m ² /s
e	Rugosidad absoluta	mm
e/D	Rugosidad relativa	—
K	Coefficiente del material del tubo	—
k	Espesor adicional por corrosión	mm
D	Diámetro interior de la tubería	m
D_e	Diámetro exterior de la tubería	m
t	Espesor calculado de la tubería	mm
$t(sel)$	Espesor seleccionado según norma	mm
V_o	Velocidad de régimen	m/s
V	Velocidad media del agua	m/s
V_1	Velocidad final después del cierre	m/s
C	Celeridad de la onda de presión (golpe de ariete)	m/s
R	Número de Reynolds	—



Tf	Tipo de flujo	—
f	Coeficiente de fricción (Darcy)	—
$\Delta hf1$	Pérdida en entrada	m
$\Delta hf2$	Pérdida en rejilla	m
$\Delta hf3$	Pérdida por fricción (Darcy)	m
$\Delta hf4$	Pérdida en codos	m
$\Delta hf5$	Pérdida por estrechamiento	m
$\Delta hf6$	Pérdida en transición	m
$\Delta hf7$	Pérdida en válvula	m
Σhf	Sumatoria de pérdidas de carga	m
K1	Coeficiente pérdida de entrada	—
K2	Coeficiente pérdida de rejilla	—
K3	Coeficiente pérdida en codos	—
P	Presión (general)	kg/m ² , bar
Pt	Presión total en la tubería	bar / kg/mm ²
Pm	Presión manométrica	psi
Cs	Coeficiente de seguridad	—
ηs	Eficiencia de soldadura	—
Sx	Esfuerzo longitudinal	kg/mm ²
Sy	Esfuerzo tangencial	kg/mm ²
Fx	Fuerza longitudinal	kg
Fy	Fuerza tangencial	kg



Ab	Área/ sección requerida de abrazadera	mm ²
l	Dilatación longitudinal	mm
Tt	Tipo de tubería	—
Nsp / Nq	Velocidad específica (bomba o turbina)	—
Nt	Velocidad de la turbina	rpm
Np	Velocidad de la bomba	rpm
Np,std	Velocidad estándar de catálogo	rpm
ηp	Eficiencia de la bomba en BEP	—
ηt	Eficiencia de la turbina (modo PAT)	—
ηgen	Eficiencia del generador	—
ηglobal	Eficiencia global (PAT + generador)	—
Φ (phi)	Coeficiente adimensional de caudal	—
Ψ (psi)	Coeficiente adimensional de altura	—
Pelec	Potencia eléctrica generada	kW
Phyd	Potencia hidráulica disponible	kW
ist	Número de etapas del impulsor	—
in	Número de entradas	—



GLOSARIO DE TÉRMINOS

BEP (Best Efficiency Point): Punto de operación en la que una bomba, logra su máxima eficiencia y un funcionamiento estable, con mínima vibración y desgaste.

Densidad o peso específico: Propiedad física que indica cuánta masa contiene un material por cada unidad de volumen, medida bajo condiciones específicas de presión y temperatura.

Energía: Propiedad física que permite a un sistema generar cambios o producir efectos sobre otros sistemas, manifestándose en diversas formas como mecánica, térmica, eléctrica o potencial.

Factor ambiental: Es una condición externa que influye en el comportamiento o integridad de un material o equipo, provocando alteraciones como degradación superficial, pérdida de resistencia o modificación de sus propiedades.

Frecuencia: Magnitud que expresa cuántos ciclos, eventos u oscilaciones ocurren en un segundo, siendo un parámetro fundamental en fenómenos ondulatorios, vibraciones y sistemas eléctricos.

Golpe de ariete: Fenómeno transitorio de presión que ocurre en sistemas hidráulicos cuando se modifica bruscamente la velocidad del flujo, generando una onda de sobrepresión que se propaga a lo largo de la tubería y puede causar esfuerzos adicionales y daños estructurales.

Montaje: Proceso de ensamblaje en donde se integran componentes o equipos en su configuración final de operación, utilizando elementos de fijación o unión para garantizar alineación, estabilidad y funcionalidad según el diseño.

NPSH (Net Positive Suction Head): Altura neta positiva de aspiración; valor que expresa la cantidad de energía existente en la entrada de la bomba en exceso de la presión de vapor del fluido.



Número Específico de Revoluciones (N): Parámetro adimensional que relaciona la velocidad de giro, el caudal y la altura generada por una turbomáquina, utilizado para identificar su tipo hidráulico y prever su comportamiento dinámico.

PAT (Pump As Turbine): Modo de funcionamiento en el cual una bomba centrífuga opera en sentido inverso al habitual, aprovechando la energía del fluido para producir potencia mecánica utilizable en un generador.

Pérdidas por Choque: Reducción de energía en una turbomáquina causada por la falta de alineación entre la dirección real del flujo y el ángulo de entrada del rodete, generando turbulencias y disminución de eficiencia.

Pérdidas por Fricción: Pérdidas de energía provocadas por el rozamiento del fluido contra las paredes internas de la turbomáquina o tuberías, así como por la acción viscosidad del fluido, lo que incrementa la resistencia al movimiento.



LISTADO DE SIGLAS

AISI: American Iron and Steel Institute (Instituto Americano del Hierro y el Acero).

ASME: American Society of Mechanical Engineering (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos).

ASTM: American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Materiales y Pruebas).

BEP: Best Efficiency Point (Punto de Mejor Eficiencia).

HP: Horse Power (Caballos de Fuerza).

IREA: Agencia Internacional de Energías Renovables.

kW: Kilowatt.

kWh: Kilowatt hora.

m.s.n.m.: Metros sobre el nivel del mar.

NPSH: Net Positive Suction Head (Altura Neta Positiva de Aspiración).

Nq: Velocidad específica (según caudal).

Ns: Número específico de revoluciones.

PAT: Pump as Turbine (Bomba como Turbina).

PIB: Producto Interno Bruto.

PLC: Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programable).

RPM: Revoluciones por minuto.

VFD: Variable Frequency Drive (Variador de Frecuencia).



INDICE DE CONTENIDOS

PRESENTACIÓN.....	I
DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
INTRODUCCIÓN	IV
RESUMEN	VI
ABSTRACT.....	VII
NOMENCLATURAS Y SÍMBOLOS.....	VIII
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	XII
LISTADO DE SIGLAS	XIV
INDICE DE CONTENIDOS	XV
INDICE DE FIGURAS.....	XXIV
INDICE DE TABLAS	XXVII
1. CAPÍTULO I: MARCO REFERENCIAL.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Descripción de la zona de estudio.....	1
1.3 Planteamiento del problema.....	4
1.3.1 Problema General.....	5
1.3.2 Problemas Específicos	5
1.4 Justificación del estudio.....	6
1.5 Alcances y limitaciones del estudio	7
1.5.1 Alcances	7
1.5.2 Limitaciones.....	7
1.6 Objetivos	7
1.6.1 Objetivo General.....	7



1.6.2 Objetivos Específicos.....	7
1.7 Hipótesis	8
1.7.1 Hipótesis General.....	8
1.7.2 Hipótesis Específicas	8
1.8 Variables	9
1.8.1 Variables independientes	9
1.8.2 Variables dependientes	9
1.9 Metodología de la Investigación.....	9
1.9.1 Enfoque de la Investigación.....	10
1.9.2 Tipo de investigación.....	10
1.9.3 Nivel de la investigación.....	10
1.9.4 Diseño de la investigación	11
1.10 Estado del Arte.....	12
1.10.1 En el contexto Nacional.	12
1.10.2 En el contexto mundial.	13
1.11 Estado Actual de la M.C.H.-Urpay	14
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	24
2.1 Centrales Hidroeléctricas.	24
2.1.1 Partes del funcionamiento de una central hidroeléctrica	24
2.2 Turbomáquinas Hidráulicas.	26
2.2.1 Definición	26
2.2.2 Clasificación de las turbomáquinas	26
2.2.2.1 Según la dirección del flujo	27
2.2.2.2 Según el componente de energía fluidodinámica modificada	28
2.2.2.3 Según el sentido de la transferencia de energía:	29



2.3 Principio de funcionamiento de turbomáquinas (Ecuación de Euler).	30
2.3.1 Triángulo de velocidades	31
2.3.2 Ecuación de Euler	32
2.3.3 Grado de acción y reacción:.....	33
2.4. Clasificación de turbinas hidráulicas según N_s	34
2.5 Número específico de revoluciones	35
2.6 Bombas hidráulicas	36
2.6.1 Bombas rotatorias	37
2.6.2 Bombas centrífugas.....	38
2.6.3 Tipos de bombas centrífugas.	39
2.6.4 Clasificación por su número específico de revoluciones	40
2.6.5 Pérdidas Hidráulicas	42
2.6.6 Pérdidas Volumétricas	42
2.6.7 Pérdidas mecánicas	43
2.6.8 Potencias y Rendimientos.	44
2.6.8.1 Potencia de accionamiento P_a :.....	44
2.6.8.2 Potencia interna P_i :	44
2.6.8.3 Potencia útil P :	44
2.6.8.4 Rendimientos o eficiencias:	45
2.6.8.5 Potencia de accionamiento o potencia al eje:	45
2.6.9 Cavitación en bombas.	46
2.7 Turbomáquinas Reversibles.....	47
2.7.1 Centrales de acumulación por bombeo:	47
2.8 Bomba trabajando como turbina.	47



2.8.1 ¿Por qué usamos una bomba como turbina?	47
2.8.2 Campos de aplicación de Bombas usadas como Turbinas.....	48
2.8.2.1 Generación de potencia:.....	48
2.8.2.2 Recuperación de potencia hidráulica:	48
2.9 Bomba como turbina.....	49
2.9.1 Componentes principales de una PAT:.....	49
2.9.1.1 La voluta:	50
2.9.1.2 El impulsor:.....	50
2.9.1.3 El tubo de aspiración:.....	50
2.9.2 Tipos de bombas utilizadas en modo turbina.....	51
2.10 Diferencias entre una bomba y una turbina.	51
3. CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LA DEMANDA DE ENERGÍA	53
3.1. Introducción.	53
3.1.1 Generación distribuida	53
3.1.2 Régimen legal de la generación distribuida en el Perú	53
3.1.3 El autoconsumo como acceso al servicio público de electricidad	53
3.2 Sistema eléctrico de Huaro-Quispicanchi	54
3.3 Comportamiento del crecimiento poblacional	55
3.4. Análisis del coeficiente de electrificación	56
3.5. Pliegos tarifarios en Huaro-Quispicanchi	57
3.6 Procesos productivos de la transformación del maíz	58
3.6.1 Proceso de selección de maíz por granos.....	58
3.6.2 Proceso de tostado de maíz	59
3.6.3 Proceso para harina de maíz	60



3.7 Maquinarias y equipos	61
3.7.1 Maquina secadora de maíz	61
3.7.2 Maquina desgranadora de maíz	62
3.7.3 Maquina eléctrica clasificadora de granos	62
3.7.4 Lavadora de tambor rotatorio.....	63
3.7.5 Freidor eléctrico	64
3.7.6 Molino de granos	65
3.7.7 Tamizador de harinas	66
3.7.8 Selladoras para sacos	67
3.8 Diagrama de carga y factor de carga.....	68
4. CAPÍTULO IV: OBRAS MECÁNICAS DE LA M.C.H. URPAY	73
4.1. Introducción.	73
4.2 Tubería de presión.....	73
4.3 Cálculo y dimensionamiento hidráulico	74
4.3.1 Factores para el diseño y selección de la tubería de presión.....	76
4.3.2 Selección del material de la Tubería Forzada	77
4.4 Número de tuberías	77
4.5 Cálculo del espesor del tubo (t)	78
4.6 Cálculo de pérdidas de carga	82
4.6.1 Pérdidas en la entrada de agua en la tubería	82
4.6.2 Pérdida en la rejilla	83
4.6.3 Pérdida por fricción en el tubo.....	83
4.6.4 Pérdida en codos	84
4.6.5 Pérdidas totales	85
4.7 Verificación de esfuerzos en el tubo	86



4.7.1 Esfuerzo longitudinal	86
4.7.2 Esfuerzo tangencial	86
4.8 Juntas de dilatación	87
4.9 Bridas	88
4.10 Metodología elección de PAT	88
4.10.1 Metodología y autores.....	88
4.11 Autores, métodos y correlaciones adicionales para la predicción de rendimiento de PATs	89
4.11.1 Correlaciones empíricas.....	91
4.12 Datos de partida del proyecto	91
4.13 Metodología de cálculo.....	92
4.14 Verificación de consistencia	93
4.15 Cálculos detallados por escenario	93
4.15.1 Escenario A: Velocidad objetivo turbina $N_t = 851.62$ rpm	93
4.15.1.1 Eficiencias estimadas y ajuste.....	93
4.15.1.2 Parámetros bomba (BEP) @ 851.62 rpm (con $\eta_{max,p} = 0.77$)	93
4.15.1.3 Cálculo N_{sp} @ 851.62 rpm.....	94
4.15.1.4 Escalonado a velocidades estándar	94
4.15.1.5 Implicaciones prácticas de $N_t = 851.62$ rpm	94
4.15.2 Escenario B: Velocidad objetivo turbina $N_t = 1550$ rpm	95
4.15.2.1 Eficiencias estimadas y ajuste.....	95
4.15.2.2 Parámetros bomba (BEP) @ 1550 rpm (con $\eta_{max,p} = 0.80$)	95



4.15.2.3 Cálculo N_{sp} @ 1550 rpm.....	95
4.15.2.4 Escalonado a velocidades estándar	95
4.15.2.5 Implicaciones prácticas de $N_t = 1550$ rpm	96
4.16 Análisis comparativo y tipos de bombas	96
4.16.1 Comparación de especificaciones requeridas	96
4.16.2 Tipos de bomba asociadas	97
4.17 Método J. M Chapallaz, P, Eichenberger, G. Fisher.....	97
4.17.1 Diseño de altura y caudal.....	97
4.17.2 Velocidad específica en modo turbina.....	98
4.17.3 Velocidad específica en modo bomba	99
4.17.4 Eficiencia de la bomba.....	100
4.17.5 Conversión de las condiciones de diseño de turbina en condiciones de diseño de bomba	101
4.17.6 Conversión de las condiciones de diseño de bomba a velocidad nominal de turbina a velocidad nominal de bomba	102
4.18 Análisis para la selección de la turbina.....	102
4.18.1 Elección de bomba como turbina (PAT) comercial.....	105
5. CAPÍTULO V: GRUPO HIDROELÉCTRICO Y ESPECIFICACIONES TECNICAS. .	107
5.1. Introducción.....	107
5.1.1 Normas.....	107
5.1.2 Unidades de medida.....	108
5.1.3 Documentación técnica.....	108
5.2 Grupo Hidroeléctrico.	108
5.3.1 Especificaciones técnicas de la bomba.	111
5.4 Motor asíncrono como generador.	113



5.5.2 Partes del regulador electrónico de carga	121
5.6 Tubería forzada.	123
5.6.1 Especificaciones de la tubería.	123
5.7 Válvulas.	125
5.7.1 Características de la válvula mariposa	125
6. CAPÍTULO VI: ANÁLISIS ECONÓMICO	127
6.1 Generalidades.....	127
6.2 Objetivo de la evaluación económica	127
6.3 Alternativas de generación.....	127
6.4 Presupuesto base	128
6.4.1 Presupuesto base de rehabilitación M.C.H. Urpay	128
6.5 Análisis económico de alternativas de generación	131
6.5.1 Consideraciones generales	131
6.5.2 Costos fijos y costos variables	132
6.5.2.1 Costos fijos:	132
6.5.2.3 Costos totales:	134
6.5.3 Determinación de costos de kWh instalado y kWh producido.	135
6.5.4 Discusión de la evaluación económica.	138
6.6 Evaluación económica financiera del proyecto	139
6.6.1 Indicadores económicos utilizados	139
6.6.1.1 Ingresos del proyecto de inversión:	140
6.6.2 Calculo de ingresos y desembolsos.....	141
6.6.2.1 Cálculo de ingresos.....	141
6.6.2.2 Cálculo de desembolsos.....	142



6.6.3 Financiación del proyecto.	142
6.7 Calculo de rentabilidad por métodos dinámicos.....	142
6.7.1 Valor Actual Neto (VAN).....	142
6.7.2 Tasa Interna de Retorno (TIR).....	143
CONCLUSIONES	146
RECOMENDACIONES.....	148
BIBLIOGRAFÍA	149
ANEXOS	151



INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa político del distrito de Huaro.....	2
Figura 2 Imagen satelital de la ubicación de la M.C.H. Urpay.....	2
Figura 3 Temperatura anual.....	3
Figura 4 Radiación Solar	4
Figura 5 Captación de agua en la actualidad	15
Figura 6 Canal de derivación en la actualidad.....	16
Figura 7 Desarenador en la actualidad.....	16
Figura 8 Cámara de carga en la actualidad	17
Figura 9 Casa de máquinas en la actualidad	18
Figura 10 Tubería forzada en la actualidad	18
Figura 11 Cuencas de los ríos de Urpay	20
Figura 12 Diagrama cronológico del río de Urpay	21
Figura 13 Diagrama de duración del río de Urpay	21
Figura 14 Clasificación general de las turbomáquinas, detalles, especificaciones y diferencias existentes.....	27
Figura 15 Turbina axial y Radial	28
Figura 16 Esquema básico de una turbina de acción tipo Pelton.....	28
Figura 17 Esquema básico de una turbina de reacción Francis	29
Figura 18 Rodete de una bomba centrífuga con los triángulos de velocidad	30
Figura 19 Componentes de los triángulos de velocidad de entrada y salida	31
Figura 20 Triángulo de velocidades.....	32
Figura 21 Comportamiento de H y Q con N_s y N_q	34
Figura 22 Curvas de H_n vs. N_q y N_s en turbinas hidráulicas.....	35
Figura 23 Clasificación de las bombas hidráulicas.....	37



Figura 24	Bomba rotatoria	38
Figura 25	Partes de una Bomba Centrífuga	39
Figura 26	Rodete: Cerrado de simple aspiración, cerrado de doble aspiración, semiabierto de simple aspiración y abierto de doble aspiración sin cara anterior ni posterior	40
Figura 27	Rodetes según N_s	41
Figura 28	Bomba con solo caja espiral, con caja espiral y cono difusor, con caja espiral, corona directriz y cono difusor	42
Figura 29	Pérdidas interiores q_i , y pérdidas exteriores q_e	43
Figura 30	Lugares donde tiene lugar las pérdidas mecánicas, en el disco P_{m3} , en las estopas P_{m2} y en el rodamiento P_{m1}	43
Figura 31	Diagrama de Sankey.....	44
Figura 32	Esquema básico de funcionamiento de una central de acumulación por bombeo .	47
Figura 33	Bomba centrífuga funcionando como bomba y como turbina	50
Figura 34	Principal diferencia de fluido y flujo de energía en bombas y turbinas.	51
Figura 35	Zona de Concesión - Electro Sur Este	54
Figura 36	Población Total de Quispicanchi 2018-2023	56
Figura 37	Variación del precio promedio de energía en el distrito de Huaro.....	57
Figura 38	Máquina secadora de maíz	61
Figura 39	Máquina desgranadora de maíz	62
Figura 40	Máquina eléctrica clasificadora de granos	63
Figura 41	Lavadora de tambor rotatorio	64
Figura 42	Freidor eléctrico	65
Figura 43	Molino de granos.....	66
Figura 44	Tamizador de harinas	67
Figura 45	Sellador para sacos	68



Figura 46	Diagrama de la curva de demanda de energía.	71
Figura 47	Croquis de la tubería de presión	75
Figura 48	Tubería de presión existente de la M.C.H. Urpay	81
Figura 49	Características de las bridas a partir del diámetro de la tubería.	88
Figura 50	Rango general de aplicación de diferentes PAT.	98
Figura 51	Relación entre N_q en modo bomba y N_q en modo turbina.	99
Figura 52	Máxima eficiencia de la bomba.....	100
Figura 53	Eficiencia máxima vs velocidad específica modo bomba.....	101
Figura 54	Selección de turbina respecto al caudal y la altura.....	104
Figura 55	Características principales de turbinas hidráulicas.....	104
Figura 56	Curvas mostradas para bomba 125-400.	106
Figura 57	Bomba centrífuga ISO 2858.....	111
Figura 58	Curvas mostradas para bomba 125-400.	112
Figura 59	Medidas de la bomba.....	113
Figura 60	Motor eléctrico de inducción como Generador Principal asíncrono de 75 kW. ..	116
Figura 61	Parámetros del motor trifásico WEG-W22	117
Figura 62	Características constructivas del motor trifásico WEG22.....	118
Figura 63	Sistema de regulación por carga balastro	119
Figura 64	Diagrama esquemático básico de un sistema con regulador de carga y curva de carga de Potencia generada.....	121
Figura 65	Tubo de acero SCH 40.	125
Figura 66	Medidas de la válvula mariposa.	126
Figura 67	Costo del kW instalado hidroeléctrico Vs. Electrógeno.....	137
Figura 68	Comparación del costo del kWh generado.....	138
Figura 69	Flujo de caja acumulado en el tiempo	145



INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Cuenca de los Ríos de Urpay	20
Tabla 2	Diferencias entre una bomba y una turbina	52
Tabla 3	Segmentación de Electro Sur Este S.A.A.	55
Tabla 4	Equipos requeridos para la planta procesadora.....	69
Tabla 5	Carga diaria de las Máquinas a instalar en la planta procesadora.....	70
Tabla 6	Datos de equipamiento de la planta procesadora.	71
Tabla 7	Parámetros de la planta procesadora.....	72
Tabla 8	Parámetros de la mini central hidroeléctrica de Urpay para 2 equipos.....	73
Tabla 9	Condiciones de operación de la M.C.H. Urpay	75
Tabla 10	Parámetros para el dimensionamiento hidráulico.	76
Tabla 11	Cálculo y verificación del espesor de la tubería	81
Tabla 12	Valores del ángulo de desviación.	84
Tabla 13	Cálculo de pérdidas de carga.	85
Tabla 14	Verificación de los esfuerzos en la tubería de presión.....	87
Tabla 15	Correlaciones para factores CQ y CH.....	91
Tabla 16	Resumen de especificaciones de bomba (Modo bomba, BEP) por unidad	96
Tabla 17	Parámetros de la mini central hidroeléctrica de Urpay	110
Tabla 18	Elementos principales de una PAT.	111
Tabla 19	Características de la PAT	112
Tabla 20	Datos de entrada de la M.C.H. Urpay	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 21	Especificaciones de la tubería de 12”	124
Tabla 22	Especificaciones de la tubería de 8”	124
Tabla 23	Características de la válvula mariposa	125
Tabla 24	Metrado y presupuesto de rehabilitación de la M.C.H. Urpay 100 Kw.....	129



Tabla 25	Presupuesto de base de la rehabilitación con un grupo diésel	131
Tabla 26	Costo del kWh.....	136
Tabla 27	Costo del kWh generado por el grupo diésel	137
Tabla 28	Venta de energía M.C.H. Urpay	141
Tabla 29	Flujo de ingresos y egresos M.C.H. Urpay	144



1. CAPÍTULO I: MARCO REFERENCIAL

Título: PROYECTO MINICENTRAL HIDROELÉCTRICA DE URPAY DE 100 KW, UTILIZANDO BOMBA COMO TURBINA, CON FINES AGRO INDUSTRIALES, HUARO-CUSCO”.

Área y línea de Investigación: Ing. Mecánica, energías renovables.

Autor: Bach. Castillo Pinares, Gimena

Asesor: Dr. Catacora Acevedo, Edgar Alfredo

1.1 Introducción

En el presente trabajo de Investigación Tecnológica trata sobre un Proyecto Minicentral Hidroeléctrica de Urpay de 100 kW de potencia con fines agroindustriales, para lo cual se plantea un sistema de Generación Distribuida independiente, donde la generación de energía eléctrica será para uso exclusivo de una Planta Agroindustrial de procesamiento de maíz. Por otro lado, desde el punto de vista tecnológico se propondrá el equipamiento con un sistema de generación no convencional, utilizando bombas como turbinas, generadores de inducción asíncronos y sistemas de control electrónicos de carga, sistemas que no han sido utilizados hasta la fecha en la región pero que se presentan como una alternativa tecnológica innovadora. Así mismo se plantea instalar una planta de procesamiento agroindustrial de maíz por ser el producto agrícola de producción en la zona de Urpay Huaro. Desde este punto en adelante, la Minicentral Hidroeléctrica de Urpay se denominará M.C.H. Urpay.

1.2 Descripción de la zona de estudio

La zona de estudio se sitúa a 3,381 msnm, en el centro poblado de Urpay a 4.5 km del distrito de Huaro, la cual se encuentra a 40 km de la ciudad del Cusco. El acceso principal al distrito Huaro es por carretera asfaltada desde Cusco, mientras que para llegar al centro poblado de Urpay desde el distrito de Huaro, se utiliza una trocha carrozable.

El asentamiento poblado de Urpay se sitúa en el distrito de Huaro de la provincia de Quispicanchi del departamento de Cusco.

Figura 1

Mapa político del distrito de Huaro



Nota: Plataforma de búsqueda derivada de Wikipedia. Tomado de www.wikiwand.com/es/articles/Provincia_de_Quispicanchi.

Figura 2

Imagen satelital de la ubicación de la M.C.H. Urpay.



Nota. Imagen satelital del 2025, tomado de *Google maps*



Datos ambientales:

Huaro está dominado por el clima oceánico, a lo largo de año llueve. La temperatura promedio es de 11.5°C.

La temporada de más fluctuaciones lluviosas es de noviembre a abril, la precipitación pluvial anual es de 632.45mm, el mes más caluroso del año llegando a temperaturas de 22°C es octubre. Junio y julio son los meses de más baja temperatura llegando a 1°C.

Temperatura media:

La temperatura media es de 11.5°C.

Figura 3

Temperatura anual



Nota: Fuente: NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

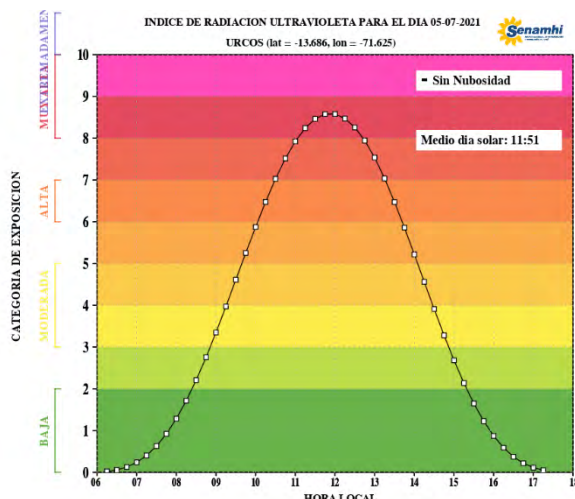
Presión ambiental: La presión ambiental promedio es de 691 hPa.

Humedad relativa: En el distrito de Huaro la humedad relativa varía mensualmente entre 54.5% hasta 79.1 %, con un promedio anual de 62,9%, se puede observar que el porcentaje más alto de humedad relativa se registra durante la temporada de lluvias.

Radiación solar:

Figura 4

Radiación Solar



Nota: Fuente: SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú).

1.3 Planteamiento del problema.

Un problema clave es como aprovechar las instalaciones de mini centrales hidroeléctricas en estado de abandono, las cuales tienen el potencial de suministrar energía eléctrica para usos independientes y/o a la red pública del sistema interconectado. Estas instalaciones, a diferencia de las centrales térmicas y otras, no necesitan de combustible ni combustibles orgánicos que generen contaminación. Las mini centrales hidroeléctricas únicamente necesitan agua para generar energía eléctrica. En donde me basare en la generación de energía para la alimentación de un grupo hidroeléctrico con fines agroindustriales, en la localidad de Urcos.

Situación actual

La comunidad de Urcos, distrito de Huaro, se encuentra ubicada a 80 minutos de la ciudad del Cusco, en la cual existen obras civiles y tubería de la antigua minicentral hidroeléctrica, dicha central utilizaba el flujo de agua de los ríos para el abastecimiento y



funcionamiento de la M.C.H. Urpay, en la actualidad estas infraestructuras de captación, conducción y control se encuentran en mal estado.

La antigua instalación contaba con dos grupos hidroeléctricos Pelton de 200 kW en mal estado de conservación, equipos que estuvieron a cargo de la Comunidad de la zona, pero por falta de mantenimiento y una gestión adecuada fueron desactivados y luego chatarreados, por lo que la antigua casa de máquinas se encuentra vacía sin equipos.

En la actualidad la zona de estudio es productora de maíz, producto que es cultivado y luego comercializado a bajos precios. Por lo expuesto en estas líneas es necesario realizar un proyecto para la reutilización de obras civiles y plantear una nueva alternativa de generación independiente, el cual aprovechará el recurso hidro energético de la zona y usar equipos de tecnología alternativa para poder suministrar electricidad a planta agroindustrial independiente de la red pública de energía.

Formulación del problema:

1.3.1 Problema General

¿Es posible realizar un proyecto M.C.H. Urpay para poder generar energía eléctrica con fines agroindustriales, utilizando tecnología de generación alternativa como son las bombas como turbina?

1.3.2 Problemas Específicos

- a) ¿Es posible efectuar el análisis de la demanda de energía a partir de la instalación de una planta agroindustrial?
- b) ¿Sera posible recalcular las condiciones operativas de la tubería de presión y definir la composición de los grupos hidroeléctricos con tecnología alternativa?
- c) ¿De qué manera se podría evaluar el uso de máquinas asíncronas que puedan generar electricidad con algún sistema de control adecuado?



- d) ¿Es posible desarrollar un análisis económico para evaluar costos de instalación y rentabilidad de la planta a rehabilitar?

1.4 Justificación del estudio

El presente estudio se justifica

- Desde el punto de vista social, porque los productos agrícolas producidos en la zona de estudio son cosechados y comercializados a bajos precios sin pasar por un proceso de transformación que podrían lograr productos de mejor calidad, mejores precios, productos diversificados y envasados para el mercado nacional e internacional (exportación). Todos estos hechos podrían mejorar la situación socioeconómica de los pobladores.
- Desde el punto de vista académico y teórico, porque permite explorar e investigar la posible utilización de bombas hidráulicas operando como turbinas, que es un tema a investigar por la escasa difusión y aplicación.
- Desde el punto de vista técnico, porque permite plantear, desarrollar un proyecto de una mini central hidroeléctrica aprovechando diferentes recursos de una instalación hidráulica que se encuentran en estado de abandono en nuestro país, que utilizaron turbinas hidráulicas y grupos hidroeléctricos convencionales, por lo que en este estudio pretendemos utilizar tecnología alternativa de generación usando bombas como turbinas y motores asíncronos como generadores asíncronos.
- Desde el punto de vista económico, porque se propone enfocar la generación de energía hidroeléctrica como un sistema de Generación Distribuida Independiente para uso exclusivo de una planta agroindustriales para el procesamiento de maíz y sus derivados, con el uso de equipos electromecánicos de menores costos de instalación.
- Desde el punto de vista ambiental, porque se propone utilizar el recurso hidráulico de la cuenca del Valle de Huaro para generación de energía hidroeléctrica sin impactar el



medio ambiente, sin producir gases de efecto invernadero (GEI) y mantener el agua para usos agrícolas y consumo humano.

1.5 Alcances y limitaciones del estudio

1.5.1 Alcances

El presente estudio tendrá un alcance de Trabajo de Investigación Tecnológica aplicada a nivel de ingeniería con la debida suficiencia académica que requiere.

1.5.2 Limitaciones

- Puesto que se plantea habilitar las instalaciones civiles e hidráulicas, se trabajará con los parámetros que brinda la instalación actual en cuanto a caudales y alturas y su límite de potencia será de 100 kW.
- En la presente propuesta de M.C.H. Urpay, se desarrollarán cálculos hidráulicos y mecánicos que permitan seleccionar en forma técnica el equipamiento electromecánico de la central.
- La obras civiles, eléctricas y electrónicas de control no se analizarán de forma detallada por no ser parte de la especialidad de Ingeniería Mecánica, solo se desarrollará a nivel descriptivo.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Efectuar el estudio de ingeniería para la M.C.H. Urpay haciendo uso de tecnología de generación alternativa como son las bombas como turbinas (PAT) y suministrar la energía hidroeléctrica producida a una planta agroindustrial.

1.6.2 Objetivos Específicos

- a) Desarrollar el análisis de carga y de demanda de energía para una planta agroindustrial de procesamiento de maíz y derivados.



- b) Realizar el cálculo hidráulico de la nueva tubería de presión y desarrollar el proceso analítico para determinar los parámetros operativos de las bombas que trabajaran como turbinas.
- c) Desarrollar un análisis técnico y determinar los parámetros eléctricos para la utilización y selección de motores asíncronos como generadores asíncronos y plantear su sistema de control.
- d) Analizar los costos fijos, variables y costos de kW-hora producido por la M.C.H. Urpay y desarrollar el análisis de rentabilidad financiera de la instalación.

1.7 Hipótesis

1.7.1 Hipótesis General

El desarrollo del proyecto de la M.C.H. Urpay de 100 kW permitirá plantear un sistema de generación de energía hidroeléctrica utilizando bombas como turbina generando 100 kW de potencia para suministrar a una planta con fines agroindustriales.

1.7.2 Hipótesis Específicas

- a) El análisis de la carga y demanda de energía de la planta agroindustrial permitirá determinar los parámetros operativos del sistema eléctrico como son máxima potencia, energía consumida diaria, factor de carga y horas de utilización.
- b) El diseño hidráulico de la tubería de presión y el desarrollo analítico que permita determinar los parámetros de las PAT permitirán definir las características del equipamiento mecánico de la M.C.H. Urpay.
- c) La determinación de los parámetros eléctricos para la selección de motores asíncronos como generadores asíncronos y su sistema de control permitirán determinar las características operativas del grupo hidroeléctrico.
- d) La evaluación de los costos del kW instalado, costos de kW-hora generado, e índices de rentabilidad (VAN y el TIR) permitirán conocer la rentabilidad del proyecto.



1.8 Variables

1.8.1 Variables independientes

- Q: caudal de diseño (m³/seg).
- H: altura neta (m).
- η_t : eficiencia de la bomba (%).
- N: velocidad de rotación (RPM).

1.8.2 Variables dependientes

- Pe: Potencia al eje de la turbina (kW).
- PEE: Potencia eléctrica (kW).

1.9 Metodología de la Investigación

La metodología utilizada para elaborar esta tesis se sustenta en los objetivos general y específicos, siguiendo una secuencia ordenada en cada fase del estudio. De acuerdo con lo expuesto por Alfaro Rodríguez (2012), se menciona que: “La investigación debe cumplir unas características fundamentales” las cuales son:

- Coherencia: todas las etapas se articulan entre sí con el fin de comprobar las hipótesis planteadas.
- Intencionalidad: implica la disposición del investigador para examinar nuevos fenómenos y generar conocimiento.
- Planificación: los objetivos se establecen de manera anticipada.
- Reflexividad: comprende procesos razonados que permiten alcanzar un propósito determinado.
- Secuencial: su desarrollo exige conocer y comprender las fases anteriores.
- Sistemática: integra un conjunto de estrategias orientadas al logro de los objetivos.



1.9.1 Enfoque de la Investigación.

La presente investigación es de un **enfoque Cuantitativo**, porque se centra en la medición y el análisis numérico de un proceso de generación de energía hidroeléctrica.

Busca cuantificar los datos y parámetros de entrada de un sistema de generación hidráulica y utiliza herramientas físico matemáticas para identificar patrones, relaciones y probar hipótesis

1.9.2 Tipo de investigación.

La investigación es del tipo **aplicada y tecnológica**, la investigación tecnológica busca resolver problemas de ingeniería a partir de conocimientos ya establecidos; no pretende descubrir nuevas leyes, sino identificar y desarrollar procesos tecnológicos requeridos por la sociedad. Se considera una investigación aplicada porque permite analizar el funcionamiento de equipos de generación energética, los cuales, tras un estudio adecuado, pueden ser diseñados, fabricados o seleccionados para evaluar su desempeño técnico. Asimismo, es de enfoque cuantitativo, dado que los fenómenos analizados se abordan mediante la recopilación sistemática de datos y su posterior evaluación mediante métodos analíticos y formulaciones propias de la especialidad, con el fin de dar respuesta a las preguntas de investigación planteadas.

1.9.3 Nivel de la investigación

La investigación es exploratoria, descriptiva, correlacional y explicativa. Se considera exploratoria porque, en las etapas iniciales, es necesario profundizar en el fenómeno estudiado para comprenderlo mejor. Es descriptiva debido a que se requiere identificar cómo es el fenómeno y de qué manera se manifiesta. Resulta correlacional porque se analizan las relaciones existentes entre las variables involucradas. Finalmente, es explicativa ya que busca determinar las causas de los eventos físicos observados.



1.9.4 Diseño de la investigación

Investigación **No Experimental**, porque se describirá y se presentara los procedimientos del fenómeno de generación de energía hidroeléctrica tal como ocurren en su ambiente natural similar, con capacidad de manipular la variable de entrada.

El estudio que se llevará a cabo, se estructurará como un proceso progresivo y secuencial orientado al cumplimiento de los objetivos planteados. Las fases necesarias para alcanzarlos son:

- **Marco teórico y revisión de literatura:** Se llevará a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva sobre estudios relacionados con las PAT, el uso de este tipo de turbomáquinas y los mecanismos de conversión de energía mecánica en eléctrica mediante bombas centrífugas. Asimismo, se analizarán los antecedentes de investigaciones previas que incluyan trabajos experimentales desarrollados en bancos de pruebas.
- **Planteamiento del problema:** Se identifica y delimita la situación problemática que se pretende analizar, considerando sus implicancias técnicas y económicas.
- **Formulación de objetivos:** Se establecen las metas y alternativas de ingeniería orientadas a resolver la problemática definida.
- **Proposición de hipótesis:** Se plantean posibles explicaciones o soluciones al problema, anticipando resultados que posteriormente deberán verificarse para confirmar o descartar su validez.
- **Análisis y procesamiento de datos:** La información obtenida será procesada y evaluada, empleando gráficos y métodos analíticos para evidenciar la generación de energía mecánica y eléctrica en las turbomáquinas ensayadas.



- **Obtención de resultados:** Se efectuarán los cálculos necesarios para comprobar el cumplimiento de los objetivos vinculados con la generación de energía mediante una bomba centrífuga utilizada en modo inverso.
- **Divulgación y presentación:** Los hallazgos de la investigación serán difundidos y defendidos formalmente ante el jurado correspondiente.

1.10 Estado del Arte

1.10.1 En el contexto Nacional.

En el estudio sobre el funcionamiento de una bomba en modo turbina, se hallaron referencias bibliográficas elaboradas por investigadores de la Universidad de Arequipa.

Tesis: Utilización de turbinas-bomba en sistemas de distribución de agua. (Apaza Huaquisto, 2018)

La tesis resalta que las PAT constituyen una alternativa eficiente y de bajo costo para recuperar energía en sistemas de distribución de agua donde existe exceso de presión, permitiendo sustituir turbinas convencionales en instalaciones de pequeña y mediana caída. La literatura revisada destaca además la necesidad de analizar parámetros como curvas características, velocidades específicas, rendimientos reversibles y factores de conversión, debido a que las bombas no fueron diseñadas originalmente para turbinado.

Tesis: Evaluación de aprovechamiento hidroeléctrico mediante la implementación de turbinas en líneas de conducción del sistema de agua potable en la ciudad de Arequipa. (Loza Chucalta & Mormontoy Ruelas, 2024).

La tesis señala que la selección adecuada de una PAT requiere evaluar el caudal disponible, la altura neta y las curvas características de la bomba, pues estos parámetros permiten estimar su rendimiento y punto de operación. Además, la tesis confirma que, pese a su diseño original como bombas, las PAT pueden alcanzar eficiencias aceptables cuando se



aplican correctamente en minicentrales hidroeléctricas, lo que justifica su creciente adopción en proyectos energéticos de bajo presupuesto.

1.10.2 En el contexto mundial.

Del análisis de una bomba operando o funcionando como turbina, se identificó en diversas fuentes bibliográficas estudios relacionados con el tema, ya sea orientados a demostrar su comportamiento mediante simulaciones CFD o destinados a describir su aplicación mediante la elaboración de manuales de uso. Entre las bibliografías más resaltantes se encuentran:

Libro: Manual on Pumps Used as Turbines. (Chapallaz et al., 1992).

Los autores señalan que, conociendo las condiciones del sitio, el caudal disponible (Qt) y la altura neta (Ht), es posible seleccionar el tipo de bomba a partir de un diagrama de altura frente al caudal, en el cual se presentan bombas radiales o centrífugas, mixtas y axiales dentro de los rangos de operación para bombas usadas como turbinas hasta potencias de 1000 kW. Asimismo, la eficiencia puede determinarse mediante un gráfico que relaciona el caudal nominal de la bomba con la velocidad específica. A partir de ello, se procede con el cálculo, las modificaciones necesarias, el control, la operación y el análisis económico de la bomba elegida para funcionar como turbina.

Artículo científico: Pumps As Turbines: A user's guide. (Williams, 1995).

El autor propone la elección de un tipo específico de bomba para su operación en modo turbina, describiendo las prácticas operativas y los ajustes requeridos al considerar que la velocidad específica se mantiene igual tanto en su funcionamiento como bomba como en su desempeño como turbina. Esta gama de PAT se fundamenta en bombas centrífugas estándar fabricadas por un reconocido productor del Reino Unido.

Artículo científico: Bombas de fluxo operando como turbinas-procedimiento de Seleção. (Carvalho Viana & Horta Nogueira, 2002).



Los autores analizan el desempeño de una bomba centrífuga tanto en su funcionamiento convencional como en su operación en modo turbina, destacando las ventajas de utilizarla de forma inversa como turbina hidráulica. Presentan coeficientes experimentales que permiten corregir la altura y el caudal cuando la bomba opera como turbina, tomando como referencia sus condiciones de operación como bomba. Además, proponen una metodología para seleccionar la bomba adecuada para trabajar como turbina, basada en datos de un aprovechamiento hidráulico rural con potencias menores a 50 kW.

Estos y demás autores tocaron temas relacionados a bombas operando como turbinas:

Artículos científicos:

- Bombas utilizadas como turbinas (Orlando Anibal, 2011).
- Uso de bombas funcionando como turbinas para sistemas de recalque de agua (Emilio & Barreira, 2006).
- Plantas mini hidroeléctricas con bombas centrífugas y motores de inducción. (Llamas Terrés et al., 2005).

Tesis de postgrado: Contribuições para o estudo e a aplicação de bombas funcionando como turbinas na geração descentralizada (Derick Silva, 2010).

Libros:

- Máquinas Hidráulicas. (Viedma Robles & Zamora Parra, 1997).
- Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. (Mataix y Plana, 1986).
- Turbinas Hidráulicas. (Fernández Díez, 2006).

1.11 Estado Actual de la M.C.H.-Urpay

1.11.1 Descripción de Obras Civiles

Captación De Agua

En el centro poblado de Urpay encontramos dos ríos que se unen y crean el río Urpay, anteriormente, el caudal de los ríos era utilizado para la captación y operación de la Mini

Central Hidroeléctrica de Urpay; sin embargo, en la actualidad estas estructuras de captación se encuentran deterioradas o destruidas, careciendo de bocatomas y de válvulas de apertura y cierre. Asimismo, aún se conserva un tramo de aproximadamente 5 metros del canal de derivación construido en concreto armado con piedra, el cual evidencia el antiguo recorrido empleado para la captación de los caudales fluviales.

Figura 5

Captación de agua en la actualidad



Nota: Fotografía propia

Canal De Derivación

El canal de derivación se encuentra en estado de abandono, pues aproximadamente el 20 % de su longitud presenta daños o destrucción. Este canal, que conecta la bocatoma con la cámara de carga, tiene una extensión de 4000 metros y fue construido con piedra y concreto.



Figura 6

Canal de derivación en la actualidad



Nota: Fotografía propia

Desarenador

El desarenador de la Mini Central Hidroeléctrica de Urpay requiere mantenimiento y la instalación de compuertas de ingreso y salida. Actualmente, esta estructura se encuentra en mal estado; está construida en concreto armado con piedra y se ubica a unos 20 metros de la cámara de carga.

Figura 7

Desarenador en la actualidad



Nota: Fotografía propia

Cámara De Carga

La cámara de carga está ubicada a aproximadamente 20 metros del desarenador. En cuanto a su estado, la estructura presenta un deterioro considerable: no posee una tapa de acceso ni una escalera para labores de limpieza; la compuerta principal de ingreso de agua se encuentra dañada; el canal de desfogue está destruido; y la rejilla interna está desempañada y presenta fracturas. Toda la infraestructura fue construida en concreto armado con piedra.

Figura 8

Cámara de carga en la actualidad



Nota: Fotografía propia

Casa De Máquinas

Esta infraestructura presenta un estado de deterioro significativo, pues está construida en adobe con cimentación de piedra y reforzada con concreto armado, además de contar con un techo de tejas sostenido por vigas de madera. Debido a estas condiciones, en la actualidad la edificación actual no será reutilizada, además la propuesta plantea construir otra casa de máquinas de acuerdo a las nuevas condiciones hidráulicas.

Figura 9

Casa de máquinas en la actualidad



Nota: Fotografía propia

Tubería Forzada

La tubería forzada de la Mini Central Hidroeléctrica presenta un deterioro considerable debido a su antigüedad. Se observan tramos con corrosión, ya que está construida con planchas de acero bridado unidas mediante pernos. Además, su sustentación se realiza mediante soportes de bloques de concreto armado y piedra.

Figura 10

Tubería forzada en la actualidad



Nota: Fotografía propia



1.11.2 Hidrología Del Sistema

Las características hidrológicas de la localidad de Urpay están determinadas principalmente por su estructura geológica y geográfica, así como por las condiciones climáticas del área. Estos factores influyen en aspectos como la cantidad y distribución de las precipitaciones, la presencia de hielo en las zonas altas, y los efectos del viento, la temperatura y la humedad.

La evaluación hidrológica de la zona implica estimar los caudales del río, así como los volúmenes mensuales y anuales disponibles para almacenamiento y uso, considerando los periodos de estiaje que restringen el aprovechamiento del recurso hídrico y las crecidas. Para ello, puede ser necesario recurrir al análisis de diagramas de avenidas o crecientes.

Hidrología y Cuencas del Rio Urpay

Una parte del volumen total de agua se infiltra en el suelo, otra porción se evapora en la superficie y el resto escurre a través de los drenajes naturales formados por quebradas. Estas quebradas alimentan dos ríos y un riachuelo, de los cuales se capta el recurso hídrico para el aprovechamiento de la mini central hidroeléctrica de Urpay. Una vez captadas estas aguas cuyo curso natural continuaría aguas abajo del canal de conducción se integran posteriormente en el río Huaro, permitiendo que el agua continúe su ciclo hasta llegar al mar. Los pequeños riachuelos que conforman estas microcuencas representan las áreas donde el agua se drena y fluye naturalmente.

Características Principales de los Afluentes de Urpay

- ***Pendiente de los ríos:*** La concentración del agua en un punto específico del cauce depende de diversos criterios, ya que cada río presenta múltiples pendientes que deben ser calculadas individualmente.
- ***Perímetro de los ríos:*** El perímetro de un río se define como una estimación de la longitud de la línea curva que constituye su contorno.



- **Área de los ríos:** El cálculo del área se realizó para cada río mediante mediciones de profundidad y longitud durante las épocas de lluvias y de estiaje.

Tabla 1

Cuenca de los Ríos de Urpay

RÍO	ÁREA (Km ²)
CHANCA	8.505
LLACTABAMBA	10.354
RUMRUNPAMPA	1.479

Nota: Micro Cuencas de los tres ríos afluentes de la zona (Atayupanqui Huaman, 2019).

Se cuenta con los datos de aforo de los principales afluentes del río Urpay, que se muestran en el siguiente dato de Caudales Cronológicos del río Huaro 2024.

Figura 11

Cuencas de los ríos de Urpay

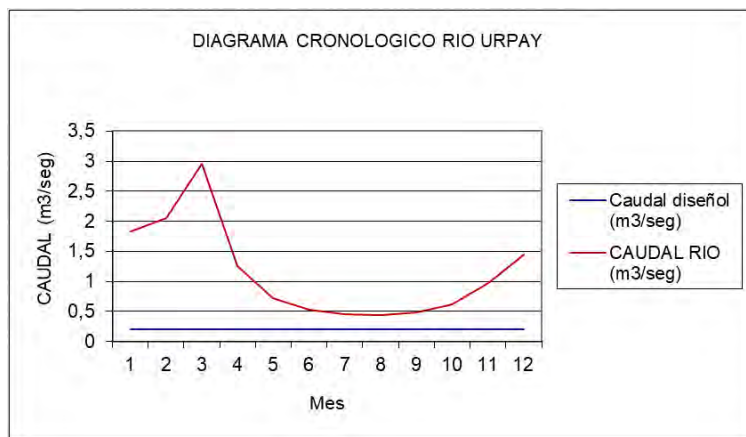
ITEM	FECHA	CAUDAL (m3/seg)	Qd (m3/seg)
1	Enero	1,830	0,2
2	Febrero	2,050	0,2
3	Marzo	2,950	0,2
4	Abril	1,250	0,2
5	Mayo	0,720	0,2
6	Junio	0,530	0,2
7	Julio	0,460	0,2
8	Agosto	0,440	0,2
9	Setiembre	0,480	0,2
10	Octubre	0,610	0,2
11	Noviembre	0,980	0,2
12	Diciembre	1,450	0,2

Nota: Fotografía propia

El diagrama Cronológico del río Urpay nos muestra el comportamiento anual típico de un río ubicado en la sierra peruana, con claro incrementos de caudales los primeros mesen del año entre diciembre y abril de casa año mostrando gráficamente a continuación:

Figura 12

Diagrama cronológico del río de Urpay

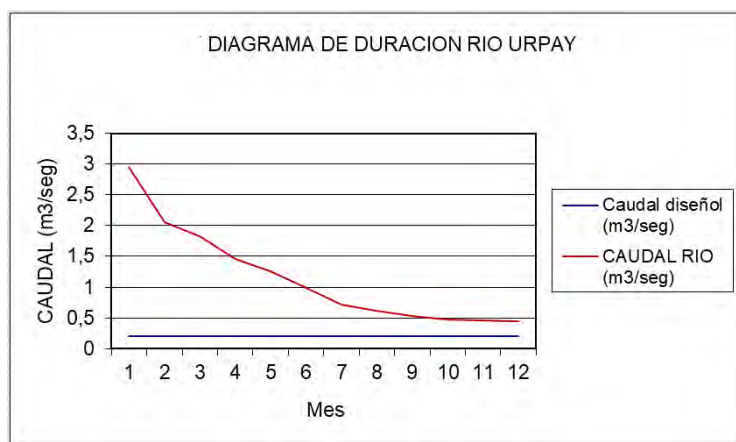


Nota: Fotografía propia

- Periodo Crítico (Estiaje máximo - agosto): Según los aforos experimentales directos, el caudal total disponible durante el estiaje más severo asciende a 0.438 m³/s. Descontando los caudales de excedencia (0.05 m³/s), se cuenta con el mismo caudal.
- Periodo de Avenidas (Lluvias - enero a abril): Los caudales experimentan un incremento bimodal sustancial, superando con holgura un promedio de 1.500 m³/s, lo que garantiza un excedente masivo de agua.

Figura 13

Diagrama de duración del río de Urpay



Nota: Fotografía propia



- El Diagrama de duración nos muestra que el caudal de diseño de la MCH Urpay de 100kW, puede consumir la cantidad de 0.200 M3/s durante los 365 días del año todo el año lo que muestra una condición de Suficiencia al 100%. Las condiciones hidrológicas del río Urpay son totalmente suficientes. Incluso en el mes más seco del año (agosto), el caudal disponible en la captación (0.438 m3/s) supera holguras y cubre con creces el requerimiento de diseño (0.200 m3/s), dejando un remanente de seguridad de casi el 50% de la oferta hídrica.

Balance Hidrológico

El balance hidrológico, es el análisis efectuado entre el agua total aportado por la cuenca y la utilización física de esta agua, quiere decir que, si analizamos la cantidad de agua total aportada por la lluvia y los aportes de agua de los manantiales o fisiones glaciares, esta cantidad de agua deberá ser igual a las perdidas por evaporación transpiración y filtración del deflujo de agua que efectivamente discurre por el cauce del río.

La ecuación que rige el balance hidrológico es:

$$A * ht \pm Vm = A * hp + Vd \quad (1.1)$$

Donde:

A = área de la cuenca (m2)

ht = altura total de lluvia caída en la cuenca (mm).

Vm = volumen de agua de manantiales o de fusión glaciár.

hp = altura de agua que representa las pérdidas de evaporación, transpiración o filtración.

Vd = volumen de agua que efectivamente discurre en el río (m3/seg).

Coeficiente De Escurrimiento

El coeficiente de escurrimiento o coeficiente de deflujo coeficiente de rendimiento hidrológico, es la relación entre la altura de agua efectivamente aprovechada y el agua total caída.



$$c = \frac{h}{ht} \quad (1.2)$$

Donde:

h = es la altura total de agua caída menos las perdidas, $ht-h_p$.

Para los casos típicos de la sierra peruana, los coeficientes de escurrimiento suelen estar alrededor del 50% esto quiere decir que la tendencia indica que alrededor del 50% del agua aportada meteorológicamente es perdida en evaporación, transpiración y filtración, para obtener este coeficiente se debe tener una data lo más exacta posible, en nuestro caso tenemos la siguiente información:

A = área de la cuenca.

ht = aporte meteorológico promedio anual.

Q_m = caudal medio estimado de la cuenca.

$$c = \frac{h}{ht} = \frac{Q_m * 31.5 * 10^6}{A * ht} \quad (1.3)$$

$$c = 0.65$$

$$c = 65 \%$$

Esto quiere decir que la cuenca del río Huaro cuenta con un coeficiente de escurrimiento que este alrededor del 65 %, esta información indica que el aprovechamiento o de flujo anual es bueno y confiable.



2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Centrales Hidroeléctricas.

Las centrales hidroeléctricas son instalaciones que generan energía eléctrica a partir del aprovechamiento del agua en movimiento, generalmente de ríos o embalses. Representan una alternativa energética renovable y no contaminante, dado que en su operación no se producen gases de efecto invernadero. Estas utilizan turbomáquinas que son dispositivos para intercambiar energía entre un fluido en flujo continuo y un eje rotatorio, utilizando el efecto dinámico en las coronas de álabes (fijos y/o móviles). El conjunto de componentes móviles integra el rotor/rodete, impulsor o hélice, y los elementos estacionarios conforman el estator, como la voluta o carcasa. A diferencia de los equipos de desplazamiento positivo, las turbomáquinas se caracterizan por mantener una continuidad del flujo del fluido, permitiendo que el intercambio energético ocurra de manera continua.

- Rotor (Rodete): Es responsable de transformar la energía del fluido en energía mecánica.
- Estator: Conjunto de componentes fijos en una turbomáquina, guías, directrices, que controlan el flujo del fluido (también conocidos como toberas). Los alabes ayudan a aumentar la velocidad del flujo y lo dirigen hacia el rotor.
- Carcasa: Es una estructura exterior que envuelve al rotor y estator en una turbomáquina. Su función es contener y proteger los componentes internos.

2.1.1 Partes del funcionamiento de una central hidroeléctrica

- Tomas de agua: Son instalaciones que recogen el agua para luego ser trasladadas a las Máquinas a través de canales o tuberías, de estas parten varios conductos a las tuberías. Estas instalaciones poseen compuertas que regulan en nivel hidráulico que será conducido hacia las turbinas, también están compuestas por rejillas metálicas



las cuales restringen el paso de componentes tales como troncos, ramas, hojas, etc.

las cuales pueden dañar las maquinarias.

- Represa: Es una estructura fabricada generalmente en un río para almacenar agua, este formará un embalse o vaso del cual se controlará el flujo del agua que será dirigido a la planta.
- Desarenadores: La función principal de los desarenadores es brindar protección a las turbinas y demás equipos; limpiando partículas sólidas y de esa manera previene del desgaste de los diferentes componentes; además mejora el rendimiento al dejar fluir agua más limpia por las tuberías.
- Aliviaderos: Estos brindan seguridad a las mini centrales, y deben ser ubicados en un sitio estratégico ya que vierten el exceso de caudal para evitar desbordes en el canal.
- Tubería: Las tuberías transportan el agua desde los canales hasta las turbinas que se encuentran en la casa de máquinas. De acuerdo al material de la tubería se podrá permitir mayor volumen de agua al trasladar a las turbinas.
- Cámara de carga: Es una estructura cuya función principal es regular el flujo del agua evitando alteraciones bruscas en la presión, garantizando un suministro constante de agua hacia las turbinas.
- Tubería forzada: La tubería forzada constituye el tramo final de conducción del caudal antes de su ingreso a la turbina, se encuentra apoyada en anclajes que le ayudan a soportar la presión generada por el agua.
- Casa de máquinas: Es la edificación que alberga los equipos electromecánicos encargados de convertir la energía cinética del agua en energía mecánica y, posteriormente, en energía eléctrica.



- Componentes de cierre de la tubería: Son elementos que se utilizan para regular el flujo de fluidos, además, separa las turbinas en caso de abruptas paradas.

2.2 Turbomáquinas Hidráulicas.

2.2.1 Definición

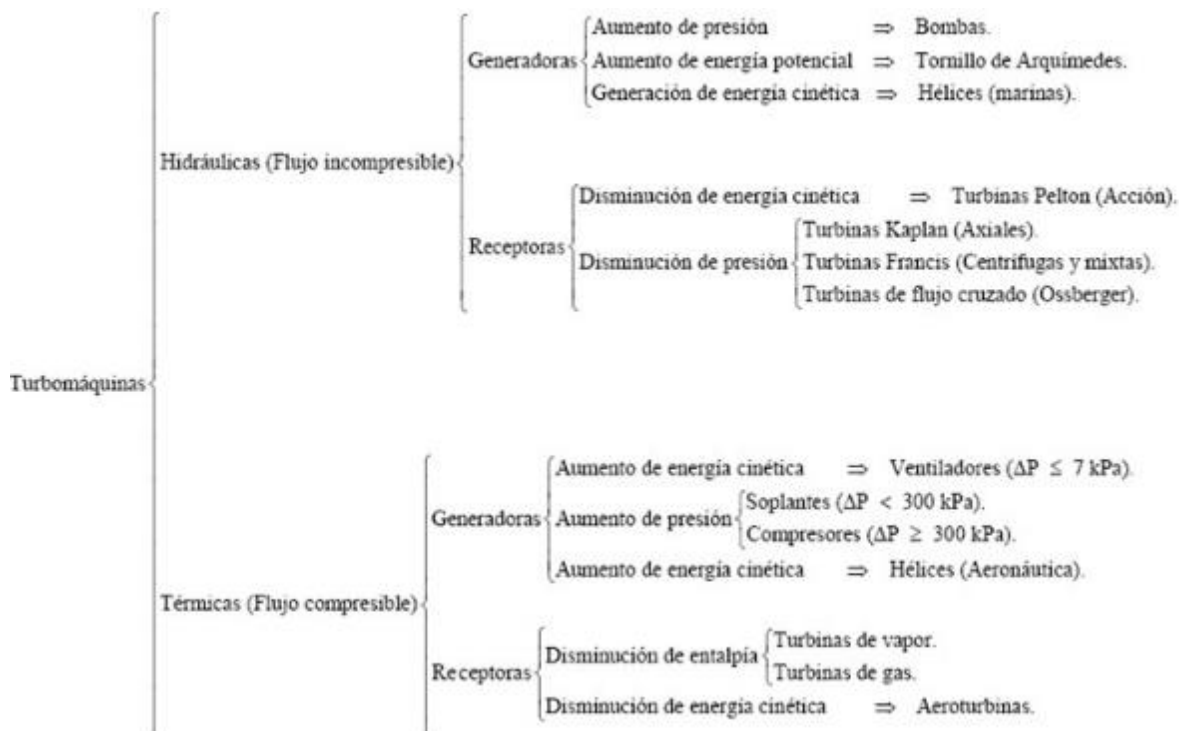
Una turbomáquina hidráulica es un dispositivo rotodinámico diseñado para trabajar con fluidos incompresibles. Este tipo de máquina puede estar formada por una única etapa o por varias dispuestas en serie; cada etapa consta de dos componentes principales: una parte fija llamada estátor, además de un elemento móvil conocido como rotor o rodete. El rotor o rodete es la parte central de la turbomáquina hidráulica, ya que en él ocurre el intercambio principal de energía entre el fluido y la máquina.

2.2.2 Clasificación de las turbomáquinas

Al clasificar turbomáquinas se tiene en consideración al órgano principal (el rodete), ya que es en este elemento donde se lleva a cabo el intercambio principal de energía entre el fluido y la máquina. Este intercambio es fundamental para el funcionamiento del sistema, permitiendo convertir la energía del fluido en energía mecánica o viceversa, dependiendo del tipo de turbomáquina.

Figura 14

Clasificación general de las turbomáquinas, detalles, especificaciones y diferencias existentes



Nota: Fuente: Garcia (2015, p. 17)

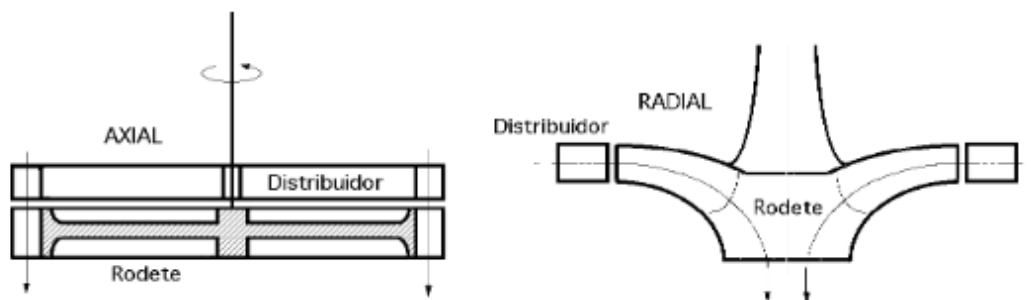
2.2.2.1 Según la dirección del flujo

- **Máquinas radiales:** son aquellas en las que las partículas del fluido se desplazan principalmente en trayectorias contenidas en planos perpendiculares al eje de rotación. Este comportamiento es característico de dispositivos como bombas de tipo centrífugo y turbinas que operan con flujo centrípeto.
- **Máquinas axiales:** son aquellas donde las líneas de corriente del fluido se encuentran contenidas en superficies generadas por la rotación de una línea alrededor de un eje, dispuestas de forma paralela al eje de giro., es decir, en superficies cilíndricas.
- **Máquinas mixtas o helicocentrífugas (en bombas) o helicocentrípetas (en turbinas):** son aquellas donde las trayectorias del fluido se encuentran en

superficies de revolución no cilíndricas. En estas máquinas, las partículas del fluido se desplazan acercándose o alejándose del eje de rotación, al mismo tiempo que poseen una componente significativa de movimiento paralela a dicho eje.

Figura 15

Turbina axial y Radial



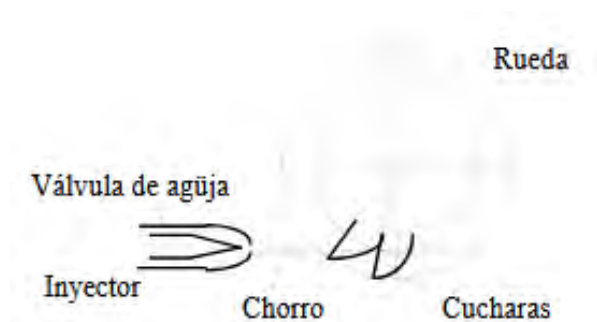
Nota: Fuente: Fernández Díez (2006, p. 4), a) Turbina axial, b) Turbina radial

2.2.2.2 Según el componente de energía fluidodinámica modificada

- **Variación de energía cinética:** es un principio clave en máquinas como la turbina Pelton, donde se utiliza exclusivamente la energía cinética del chorro de agua para realizar trabajo. Este tipo de máquinas, denominadas de acción pura, basan su funcionamiento en el aprovechamiento directo de la velocidad del fluido para generar energía mecánica.

Figura 16

Esquema básico de una turbina de acción tipo Pelton

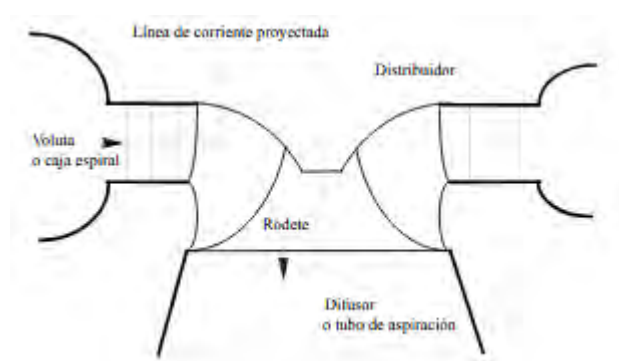


Nota: Fuente: Viedma Robles & Zamora Parra (1997, p. 8)

- **Variación de presión:** es característica de las máquinas donde el principal cambio energético corresponde a la presión, mientras que otros términos, como la energía cinética, son despreciables en comparación. Estas máquinas se conocen como máquinas de reacción. Un ejemplo representativo es la turbina Francis, en la que el fluido entra con una alta presión, interactúa con el rodete y experimenta una notable reducción en la presión estática durante el proceso.

Figura 17

Esquema básico de una turbina de reacción Francis



Nota: Fuente: Viedma Robles & Zamora Parra (1997, p. 8)

2.2.2.3 Según el sentido de la transferencia de energía:

- **Máquinas generadoras:** también conocidas como pasivas, son aquellas en las que la potencia transmitida desde el eje al rotor se emplea para incrementar la energía específica de un caudal determinado. Estos equipos demandan energía externa y elevan la energía específica del fluido durante su operación. La energía proviene principalmente de un motor eléctrico que mueve el eje. Ejemplos de este tipo de máquinas incluyen bombas, ventiladores y hélices utilizadas en aplicaciones marítimas, caracterizadas por presentar un flujo de trabajo negativo.
- **Máquinas motoras:** también conocidas como activas, en ellas, el fluido entrega una fracción de su energía al rotor, generando una potencia de salida transmitida mediante el eje. Estas máquinas producen energía al aprovechar la energía del fluido

que las alimenta. Ejemplos comunes incluyen turbinas hidráulicas y eólicas, las cuales transforman la energía del fluido en energía mecánica útil.

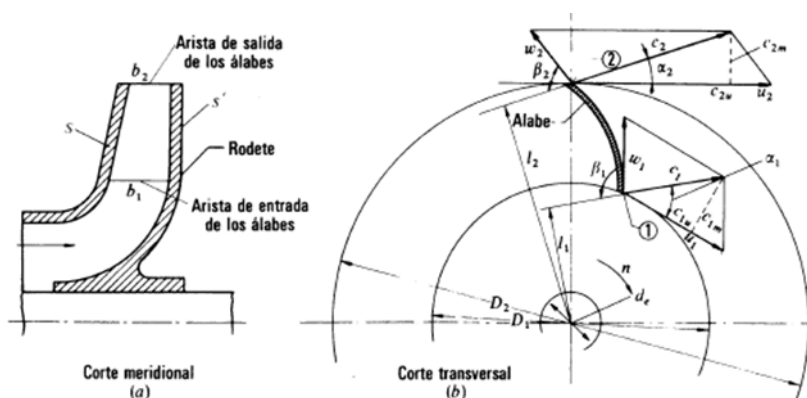
2.3 Principio de funcionamiento de turbomáquinas (Ecuación de Euler).

La ecuación de Euler para turbomáquinas es fundamental para realizar un estudio o análisis de energía en turbinas hidráulicas y turbinas térmicas, esta ecuación expresa como el cambio en la velocidad del fluido a través del rodete genera o absorbe energía.

El rodete de una turbomáquina, posee una serie de álabes que ayudan a guiar y/o modificar el flujo del agua, estos poseen ciertos ángulos de incidencia, tales como los de entrada que se encuentran en la posición (1) y los de salida (2).

Figura 18

Rodete de una bomba centrífuga con los triángulos de velocidad



Nota: Fuente: Mataix y Plana (1986, p. 359), a) corte meridional b) corte transversal.

Para el análisis en turbomáquinas, el análisis unidimensional considera que todas las partículas del fluido que ingresan en el punto 1 (entrada del alabe) y salen por el punto 2 sufren la misma desviación, este análisis facilita el cálculo y brinda un enfoque más directo.

- Velocidad absoluta del fluido (c): $c = u + w$
- Velocidad tangencial de rotación (u): $u = r * \omega$
- Velocidad relativa (w), se mueve en la dirección del álabe, además es siempre tangente a este mismo.

- α : ángulo entre la velocidad absoluta (c) y la velocidad tangencial de rotación (u).
- β : ángulo entre la velocidad relativa (w) y la velocidad tangencial de rotación (u).

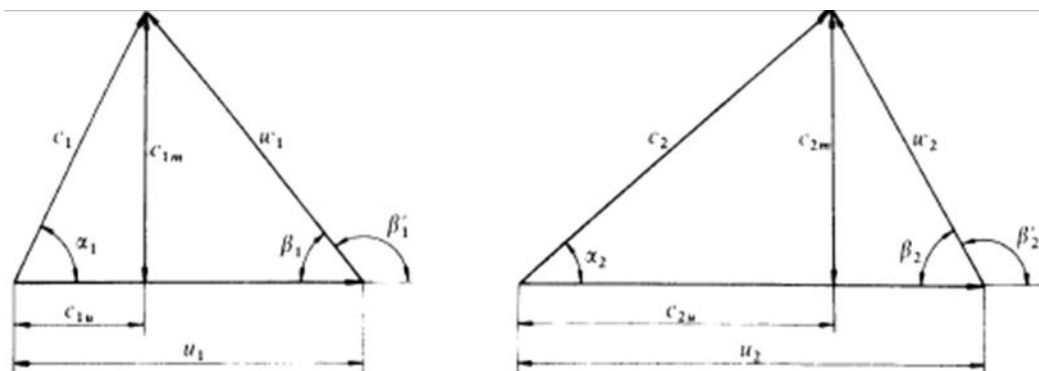
Los triángulos de velocidades son la representación gráfica entre las velocidades y los ángulos.

2.3.1 Triángulo de velocidades

Las velocidades en el triángulo de velocidad poseen magnitud y dirección por lo que se consideran vectores.

Figura 19

Componentes de los triángulos de velocidad de entrada y salida



Nota: Fuente: Mataix y Plana (1986, p. 365)

W: Velocidad relativa, sigue la dirección del alabe.

C: Velocidad absoluta, es la suma vectorial de U y W.

U: Velocidad tangencial, sigue la dirección de giro del rodete.

C1m: Componente meridional de la velocidad absoluta a la entrada.

C1u: Componente periférica de la velocidad absoluta a la entrada.

α : Ángulo formado entre C y U.

β : Ángulo formado entre W y U.

2.3.2 Ecuación de Euler

El balance energético permite facilitar los cálculos de las conversiones de energía calórica en energía potencial y energía cinética. Para completar la secuencia de transferencias energéticas, es esencial realizar una evaluación de la transformación de la energía cinética en mecánica esto se realiza en el eje de la máquina.

Esta conversión ocurre en las turbomáquinas dentro de un conjunto de paletas o álabes con diseño aerodinámica, fijados en la periferia de un disco en rotación. El fluido que se encuentra dotado de energía cinética, actúa sobre los alabes generando fuerzas sobre ellas.

Las fuerzas que actúan sobre la periferia del disco producen un par en el eje. Cuando este torque se multiplica por la velocidad de rotación del eje, se genera la potencia mecánica que el eje de la turbomáquina suministra o recibe.

1^{ra} Ecuación de Euler

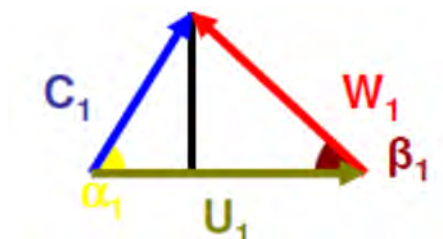
$$E = \frac{1}{g} (U_2 C_{u2} - U_1 C_{u1}) \quad \text{Para máquinas receptoras (bombas)} \quad (2.1)$$

$$E = \frac{1}{g} (U_1 C_{u1} - U_2 C_{u2}) \quad \text{Para máquinas motrices (turbinas)} \quad (2.2)$$

Aplicando la ley de cosenos:

Figura 20

Triángulo de velocidades



Nota: Elaboración propia

$$W_1^2 = U_1^2 + C_1^2 - 2C_1U_1\cos\alpha_1 = U_1^2 + C_1^2 - 2C_{u1}U_1 \quad (2.3)$$

$$W_2^2 = U_2^2 + C_2^2 - 2C_2U_2\cos\alpha_1 = U_2^2 + C_2^2 - 2C_{u2}U_2 \quad (2.4)$$



$$Cu_1U_1 = \frac{U_1^2 + C_1^2 - W_1^2}{2} \text{ Y } Cu_2U_2 = \frac{U_2^2 + C_2^2 - W_2^2}{2} \quad (2.5)$$

De donde obtenemos la segunda forma de la ecuación de Euler:

$$E = \frac{(C_2^2 - C_1^2)}{2g} + \frac{(U_2^2 - U_1^2)}{2g} + \frac{(W_2^2 - W_1^2)}{2g} \quad (2.6)$$

Para máquinas receptoras (bombas)

$$E = \frac{(C_1^2 - C_2^2)}{2g} + \frac{(U_1^2 - U_2^2)}{2g} + \frac{(W_1^2 - W_2^2)}{2g} \quad (2.7)$$

Para máquinas motrices (turbinas)

2.3.3 Grado de acción y reacción:

El grado de reacción es un parámetro que se utiliza para caracterizar la manera en que se realiza la transferencia de energía entre el fluido y el rodete. Específicamente, este concepto describe qué proporción del trabajo o de la energía total es convertida en presión estática dentro del rodete en comparación con la energía total disponible.

Por definición, el grado de reacción R (o σ en algunas bibliografías) se expresa como:

$$R = \frac{H_{estatica}}{H_{total}} \quad R = \frac{H_E}{H_D + H_E} \quad (2.8)$$

Donde:

- La altura de presión es la porción de la energía que se utiliza para aumentar la presión estática del fluido.
- La altura total incluye tanto la altura de presión como la altura dinámica asociada con la velocidad del fluido.

El valor de R puede variar dependiendo del diseño y el tipo de turbomáquina:

- $R = 0$: Indica que todo el cambio de energía se realiza en forma de energía cinética, típica en turbomáquinas puramente impulsoras (como turbinas de acción).
- $0 < R < 1$: Es un caso intermedio donde parte de la energía se transfiere a presión y otra parte a velocidad. Este es un diseño común en turbomáquinas de reacción.

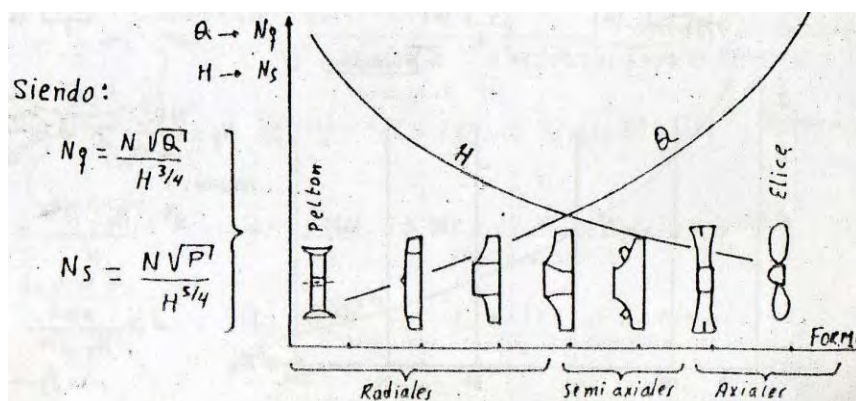
- $R = 1$: Indica que todo el cambio de energía se convierte en presión, lo cual es raro en aplicaciones prácticas.
- Todas las bombas hidráulicas son de reacción y no hay bombas de acción.

2.4. Clasificación de turbinas hidráulicas según N_s

La velocidad específica se refiere a la velocidad de rotación del rodete de una turbina, perteneciente a un conjunto de turbinas semejantes, que opera bajo un salto de 1 metro puede generar una potencia de 1 C.V. lo mismo que ocurre con las bombas, se puede observar una correlación directa entre la forma del rodete y el valor de N_s .

Figura 21

Comportamiento de H y Q con N_s y N_q



Nota: Fuente: Catacora Acevedo (n.d.)

Las turbinas Pelton presentan valores bajos de velocidad específica ($N_s < 75$), mientras que las turbinas Francis y Kaplan presentan valores más altos ($60 < N_s < 1.000$).

Una turbina funcionara de manera óptima cuando la potencia desarrollada, la altura neta y el número de revoluciones resulten en el valor de N_s al ser sustituidos en la ecuación.

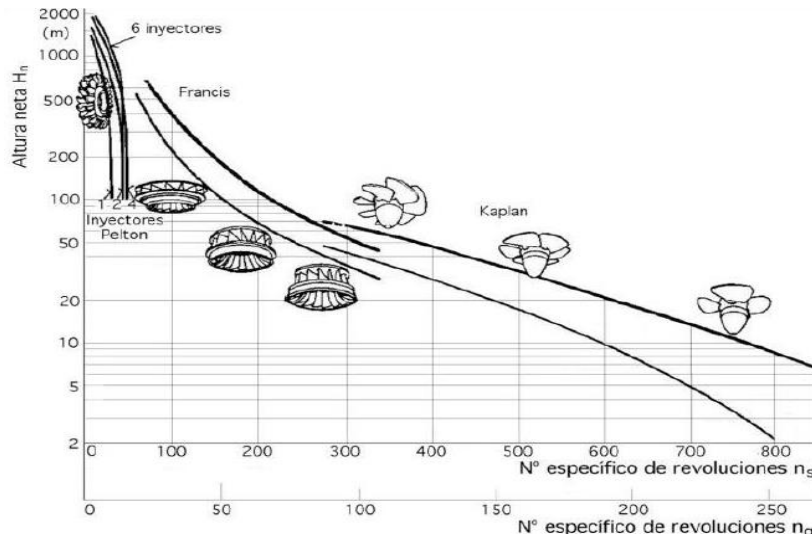
En la práctica:

- Las turbinas de baja velocidad se utilizan en saltos altos, logrando alcanzar una velocidad mayor de rotación en turbinas rápidas.

- A la velocidad de sincronización, las turbinas que giran despacio usan menos caudal que las que giran rápido.

Figura 22

Curvas de H_n vs. Nq y Ns en turbinas hidráulicas



Nota: Fuente: Catacora Acevedo (n.d.)

2.5 Número específico de revoluciones

Es un parámetro de semejanza dinámica, que se usa para describir el funcionamiento de las turbomáquinas motoras en relación con las variaciones del caudal (Q) y de la altura (H). Se determina mediante una combinación empírica arbitraria, basándose en la verificación experimental de un comprobando particular.

Número específico de revoluciones en relación con el caudal:

$$Nq = \frac{NQ^{1/2}}{H^{3/4}} = N \frac{\sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (2.9)$$

Si sabemos que $P=cQH$

Luego se deduce el número especifico de revoluciones en función de la potencia

$$Ns = \frac{N(\frac{P}{H})^{1/2}}{H^{3/4}} = N \frac{\sqrt{P}}{H^{5/4}} \quad (2.10)$$

$$Ns = N \frac{\sqrt{P}}{H^{5/4}} \quad (2.11)$$



Donde:

Ns: Velocidad específica

N: Velocidad de rotación (rpm)

P: Potencia generada (CV) o (HP)

H: Altura neta (m)

$$P = \frac{\rho * Q * H * \eta}{75} \text{ (CV)} \quad (2.12)$$

Donde:

Pa: Potencia en el eje (CV)

$$Pa = \gamma * Q * H * \eta \text{ (Watt)} = \rho * Q * H * \eta \left(\text{Kg} \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = \frac{\rho * Q * H * \eta}{75} \text{ (CV)} \quad (2.13)$$

Equivalencia: 1kW = 1.3592 CV

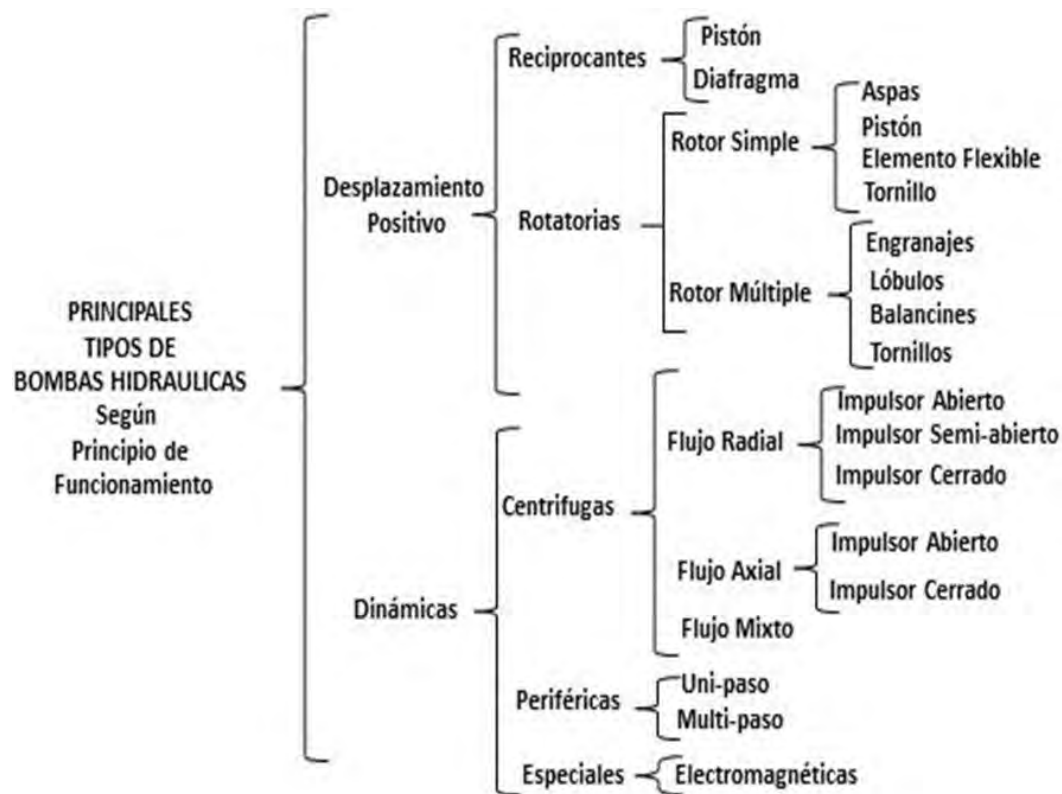
También: $ns = 3.65n\sqrt{\eta Q}H^{-3/4}$ donde: η – eficiencia total.

2.6 Bombas hidráulicas

Una bomba hidráulica es un equipo diseñado para trasladar líquidos de un punto a otro, ya sea de forma continua o intermitente. Puede manejar diversos tipos de fluidos, cómo agua limpia, aguas residuales, líquidos con suciedad, líquidos viscosos, entre otros. La elección del modelo adecuado depende de los diferentes tipos de bombas disponibles, ya que cada una ofrece características específicas en términos de potencia, caudal y altura manométrica, adaptándose a las necesidades del sistema.

Figura 23

Clasificación de las bombas hidráulicas



Nota: Extraído de Curso de Bombas, por EGHCA (<https://www.eghca.com/post/curso-de-bombas>)

2.6.1 Bombas rotatorias

Las bombas rotativas destacan por el movimiento lento y giratorio de sus componentes móviles, como ruedas dentadas o lóbulos. Su principio de funcionamiento se basa en transferir energía al fluido mediante la presión, de forma similar a las bombas de pistón. Estas bombas desplazan un volumen fijo de fluido en cada giro y les permite mantener un flujo prácticamente constante sin importar la presión. Su diseño incluye tolerancias muy ajustadas entre las partes móviles y las fijas, lo que reduce al mínimo las pérdidas entre el lado de aspiración y el de impulsión.

Figura 24

Bomba rotatoria



Nota: Fuente: Brito A. (2020)

2.6.2 Bombas centrífugas

Las bombas centrífugas están compuestas por una cámara de sección creciente, conocida como espiral o difusor, que conecta el conducto de aspiración en su centro y el conducto de descarga en su periferia. Dentro de esta cámara, un elemento giratorio llamado rodete o impulsor rota a altas velocidades (entre 1500 y 3000 rpm). Gracias a la velocidad angular generada por el impulsor, el líquido en la voluta es impulsado hacia la periferia por efecto de la fuerza centrífuga, lo que provoca una depresión en el centro. Este proceso convierte parte de la energía cinética en energía de presión, permitiendo que el líquido sea transportado hacia la tubería de descarga mientras se crea una depresión que succiona más líquido desde la tubería de aspiración.

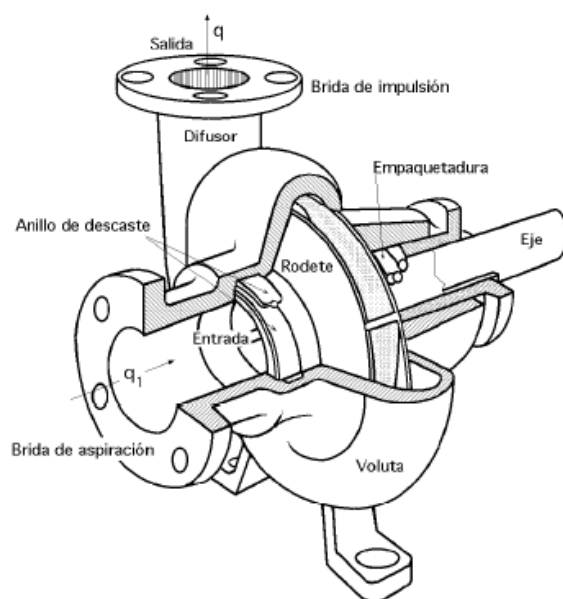
Partes de una bomba centrífuga:

- Tubería de aspiración.
- Impulsor o Rodete.
- Voluta o carcasa - Caja espiral.
- Difusor.

- Brida de aspiración.
- Brida de impulsión.
- Anillos de desgaste.
- Empaquetadura o sello mecánico.
- Eje motriz.

Figura 25

Partes de una Bomba Centrífuga



Nota: Fuente: Fernández Díez (2006)

2.6.3 Tipos de bombas centrífugas.

Bombas centrífugas radiales: Ideales para manejar altas presiones con bajos caudales, cuentan con impulsores estrechos. El fluido se mueve inicialmente de manera paralela al eje del impulsor, pero al salir lo hace de forma perpendicular a este.

Bombas centrífugas axiales: Diseñadas para trabajar con niveles de presión bajos acompañados de altos volúmenes de flujo, poseen impulsores con geometría similar a una hélice que generan un movimiento del fluido orientado totalmente a lo largo del eje de la

máquina. La energía se transfiere mediante la transferencia de energía realizada por los álabes al interactuar directamente con el flujo.

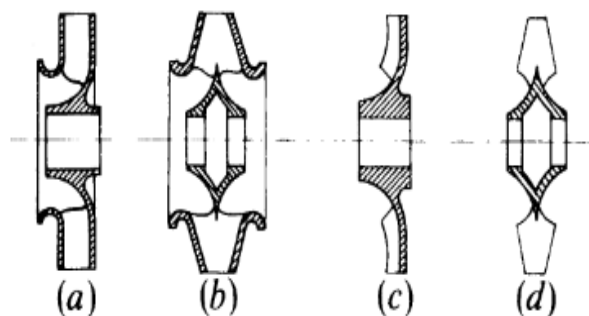
Bombas centrífugas diagonales: Son apropiadas para trabajar con presiones y caudales intermedios, ya que combinan las características de flujo radial y axial, conocidas como flujo mixto. La energía se transfiere al fluido tanto mediante la acción centrífuga como por el empuje directo de los álabes.

2.6.4 Clasificación por su número específico de revoluciones

Los rodets se clasifican en cuatro tipos según la forma de sujeción de los álabes:

Figura 26

Rodete: Cerrado de simple aspiración, cerrado de doble aspiración, semiabierto de simple aspiración y abierto de doble aspiración sin cara anterior ni posterior

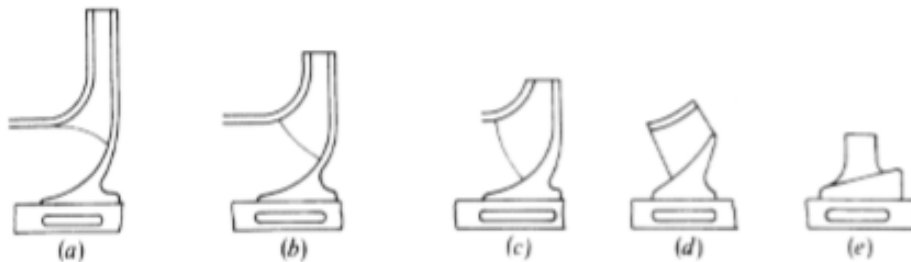


Nota: Fuente: Mataix y Plana (1986, p. 380)

Los rodets de la figura 23 ilustran cómo se adaptan para manejar caudales más elevados, presentando alturas efectivas considerablemente menores.

Figura 27

Rodetes según Ns



Nota: Fuente: Mataix y Plana (1986, p. 381), a) Rodete radial lento Ns entre 40 a 80, b) Ns de 80 a 140, c) Ns de 140 a 300, d) Rodete semi axial o mixto con Ns de 300 a 600, e) Rodete axial rápido con Ns entre 600 a 1800

La clasificación más precisa de las bombas rotodinámicas es una clasificación numérica.

Cálculo del Ns:

$$Ns = \frac{N\sqrt{P}}{H^{\frac{5}{4}}} \quad (2.14)$$

Donde:

Ns: Número específico de revoluciones

N: Velocidad de rotación (rpm)

P: Potencia generada (CV)

H: Altura neta (m)

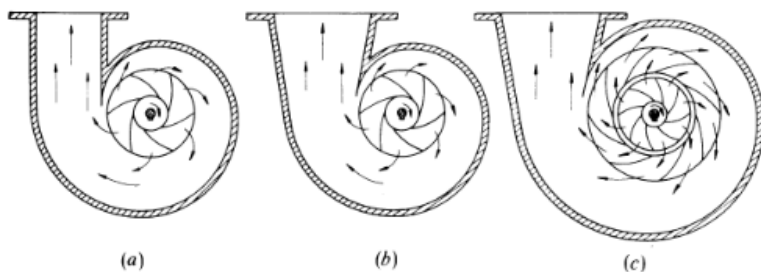
$$P = Q\rho gH \text{ (W)} = \frac{Q\rho H}{75} \text{ (CV)} \quad (2.15)$$

Sistema difusor: Este sistema consta de tres elementos.

- Corona directriz.
- Caja espiral.
- Cono difusor.

Figura 28

Bomba con solo caja espiral, con caja espiral y cono difusor, con caja espiral, corona directriz y cono difusor



Nota: Fuente: Mataix y Plana (1986, p. 382)

2.6.5 Pérdidas Hidráulicas

Las pérdidas hidráulicas reducen la energía específica efectiva que la bomba transmite al fluido, lo que a su vez disminuye la altura útil del sistema.

- Pérdidas de superficie: Las pérdidas de superficie ocurren debido al rozamiento del fluido con las paredes de la bomba y a la fricción entre las propias partículas del fluido.
- Pérdidas de forma: Las pérdidas de forma ocurren debido al desprendimiento de la capa límite en los cambios de dirección y en cualquier geometría que dificulte el flujo.

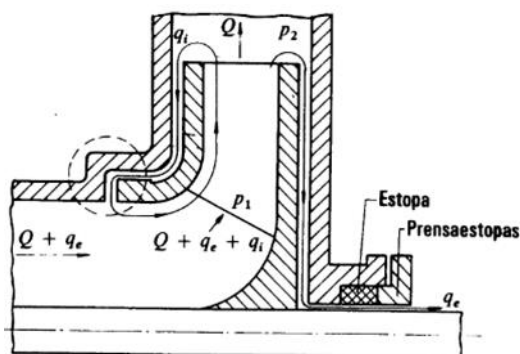
2.6.6 Pérdidas Volumétricas

Estas pérdidas, también conocidas como pérdidas intersticiales, representan una reducción del caudal y se clasifican en dos tipos:

- Pérdidas exteriores q_i : Ocurren debido a fugas en el sistema, como uniones defectuosas o grietas en las tuberías.
- Pérdidas interiores q_e : Se deben a la filtración del fluido a través de espacios internos del sistema, como holguras entre componentes mecánicos.

Figura 29

Pérdidas interiores q_i , y pérdidas exteriores q_e



Nota: Fuente: Mataix y Plana (1986, p. 391)

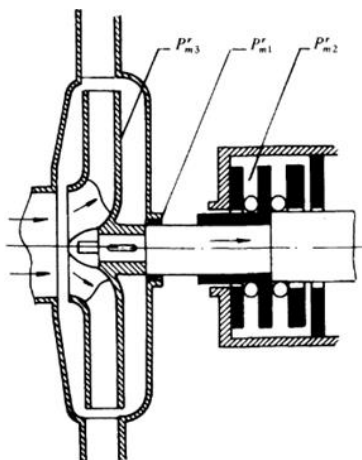
2.6.7 Pérdidas mecánicas

Estas pérdidas se generan por la fricción entre los siguientes elementos:

- Rozamiento del prensaestopas con el eje de la máquina.
- Rozamiento del eje con los cojinetes.
- Por accionamiento de auxiliares (bomba de engranajes para lubricación, cuentarrevoluciones, etc.)

Figura 30

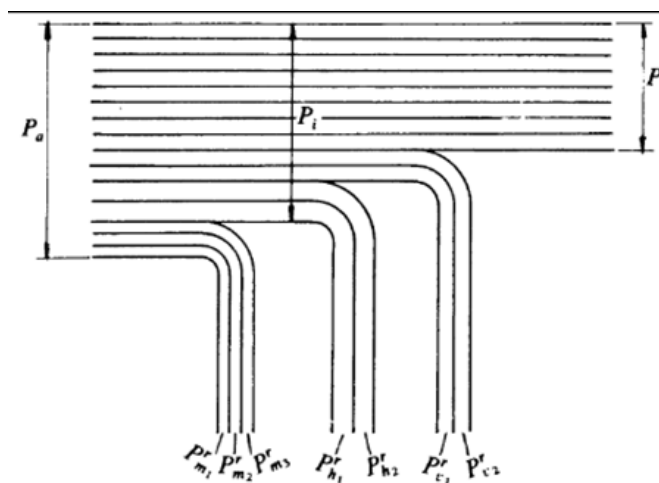
Lugares donde tiene lugar las pérdidas mecánicas, en el disco $Pm3$, en las estopas $Pm2$ y en el rodamiento $Pm1$



Nota: Fuente: Mataix y Plana (1986, p. 393)

Figura 31

Diagrama de Sankey



Nota: Representa las pérdidas mecánicas, hidráulicas y volumétricas y la entrega de potencia final P entregada al fluido. Fuente: Mataix y Plana (1986, p. 394)

2.6.8 Potencias y Rendimientos.

En la Figura 20, se observa que las pérdidas generan una reducción en la potencia neta transferida por el rodete al fluido. Esto ocurre debido a la fricción, turbulencias y desprendimientos en el flujo, lo que disminuye la energía útil disponible en el sistema.

2.6.8.1 Potencia de accionamiento P_a :

En un grupo moto-bomba es la potencia libre en el eje (La potencia entregada por el motor eléctrico se obtiene al multiplicar la potencia absorbida de la red por el rendimiento del motor eléctrico).

2.6.8.2 Potencia interna P_i :

La potencia suministrada al rodete se obtiene restando las pérdidas mecánicas a la potencia de accionamiento.

2.6.8.3 Potencia útil P :

Incremento de potencia que experimenta el fluido en la bomba.

Potencia de accionamiento P_a :



$$Pa = M * W = \frac{2\pi}{60} N * M = 0.1047NM \quad (2.16)$$

Dónde:

M= momento torsional en el eje de la máquina (N*m) S.I.

N= velocidad de giro del eje de la bomba (rpm).

Potencia interna Pi: potencia total transmitida al fluido o potencia de accionamiento descontando las pérdidas mecánicas:

$$Pi = Pa - Pmecanicas \quad (2.17)$$

Potencia útil P: es la invertida en impulsar un caudal útil a una altura útil H.

$$P = \rho g H Q \quad (2.18)$$

Finalmente, la potencia interna afectada por la eficiencia volumétrica e hidráulica:

$$Pi = \frac{\rho g H Q}{\eta v * \eta h} \quad (2.19)$$

2.6.8.4 Rendimientos o eficiencias:

Las eficiencias internas y totales de la turbomáquina:

$$\eta i = \eta v * \eta h \quad (2.20)$$

$$\eta total = \eta t = \eta v * \eta h * \eta m \quad (2.21)$$

En el caso de bombas hidráulicas:

$$\eta h = \frac{H}{Hr} \text{ En algunas bibliografías H también se da como altura útil } \eta h = \frac{Hu}{Hr}$$

En bombas la altura del rodete HR>H (siempre debe ser para garantizar la capacidad de bombeo).

2.6.8.5 Potencia de accionamiento o potencia al eje:

$$Pa = Pe = \frac{\rho g H Q}{\eta v * \eta h * \eta m} = \frac{\rho g H Q}{\eta b} = \frac{\gamma H Q}{\eta b} \quad (2.22)$$

Dónde:

Pe= Potencia al eje (kW).

H= Altura útil o efectiva (m).



Q = Caudal útil o de diseño (m^3/s).

γ = Peso específico del agua (N/m^3).

La potencia efectiva en otras unidades:

$$Pa = Pe = \frac{\rho H Q}{76(\eta v * \eta h * \eta m)} = \frac{\rho H Q}{76 \eta b} = \frac{\rho H Q}{76 \eta b} \quad (2.23)$$

Dónde:

Pe = Potencia al eje (HP).

ρ = Densidad del agua (Kg/m^3).

2.6.9 Cavitación en bombas.

La cavitación en las bombas genera dos efectos negativos: disminución del rendimiento y erosión de los componentes. Su aparición está influenciada por varios factores:

- Tipo de bomba: La cavitación es más pronunciada en bombas con mayor velocidad específica (N_s), ya que operan con menores presiones en la succión.
- Instalación de la bomba: La altura de suspensión (H_s), es decir, la diferencia de altura entre la bomba y el nivel del líquido en el depósito de aspiración, afecta la presión en la entrada de la bomba. Si esta altura es demasiado grande, la presión en la succión puede descender por debajo de la presión de vapor del fluido, favoreciendo la cavitación.
- Condiciones de servicio: El caudal bombeado debe mantenerse dentro del rango recomendado. Si el caudal supera el máximo permisible, aumentan las pérdidas por fricción y las caídas de presión en la succión, incrementando el riesgo de cavitación.

La altura de aspiración necesaria: $NPSH_{necesaria} = \Delta h = H_{ed} \min$

$$H_{ed} \min = \left(\frac{P_A - P_S}{\rho g} - H_s - H_{rA} - E \right) \min = \left(\frac{P_e - P_S}{\rho g} + \frac{C E^2}{2g} \right) \min \quad (2.24)$$

Altura de aspiración máxima de la bomba:

$$H_s \max = \left(\frac{P_A - P_S}{\rho g} - H_{rA} - E - \Delta h \right) \quad (2.25)$$

2.7 Turbomáquinas Reversibles.

Existen varios tipos de máquinas reversibles, capaces de operar tanto como bomba como turbina, también conocidas como grupo binario. Estas máquinas están diseñadas para adaptarse a distintos rangos de alturas de salto

Ventajas: Menor obra civil, menores dimensiones, menor coste, entre otras.

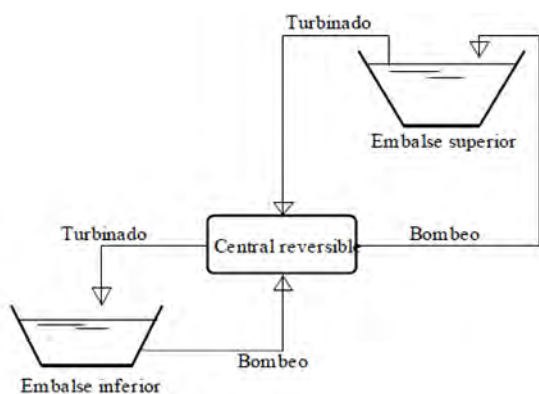
Desventajas: Menor rendimiento, mayor tiempo de maniobra, presencia de vibraciones, entre otras.

2.7.1 Centrales de acumulación por bombeo:

La demanda de electricidad en una red varía significativamente a lo largo del día y según la época del año. Estas fluctuaciones generan grandes variaciones en la energía requerida, lo que afecta la estabilidad y eficiencia del sistema eléctrico suministrador. Para hacer frente a estas variaciones, se implementan estrategias como; centrales hidroeléctricas reversibles, que almacenan energía en momentos de baja demanda y la liberan en períodos de alta demanda.

Figura 32

Esquema básico de funcionamiento de una central de acumulación por bombeo



Nota: Fuente: Viedma Robles & Zamora Parra (1997, p. 250)

2.8 Bomba trabajando como turbina.

2.8.1 ¿Por qué usamos una bomba como turbina?

Se utiliza una bomba como turbina considerando los siguientes aspectos:



Costo:

Las bombas estándar son más económicas que las turbinas de tamaño similar, ya que su fabricación requiere materiales menos costosos. Además, el mercado de bombas es más amplio, lo que reduce su precio en comparación con el de las turbinas.

Disponibilidad:

Las bombas y sus repuestos son más fáciles de encontrar que los de las turbinas, especialmente en países en desarrollo, lo que facilita su mantenimiento y reparación.

Diseño y mantenimiento:

Gracias a su construcción sencilla, las bombas estándar no requieren personal altamente capacitado para su mantenimiento, lo que las hace más prácticas y accesibles que las turbinas.

(Chapallaz et al., 1992, p. 4) Procesamiento: (Gimena Castillo Pinares).

2.8.2 Campos de aplicación de Bombas usadas como Turbinas.

2.8.2.1 Generación de potencia:

Las bombas utilizadas como turbinas han sido empleadas durante décadas en grandes sistemas de almacenamiento por bombeo con capacidades de varios megavatios. Estas bombas están especialmente diseñadas para funcionar en ambos modos: durante la noche, bombean agua al embalse cuando la electricidad es más barata, y durante el día, operan como turbinas para generar energía en momentos de alta demanda.

Aunque las bombas estándar no fueron originalmente diseñadas para funcionar como turbinas, en la actualidad se utilizan cada vez más en micro centrales con potencias que van de 5 a 500 kW.

2.8.2.2 Recuperación de potencia hidráulica:

El uso de bombas reversibles como turbinas para la recuperación de energía hidráulica permite aprovechar esta energía con un costo mínimo, mejorando así la eficiencia global de la planta. En los últimos años, el interés por esta tecnología ha aumentado debido al alza en los



precios de la energía y a una mayor conciencia sobre la importancia de su conservación.

(Chapallaz et al., 1992, p. 5) Procesamiento: (Gimena Castillo Pinares).

Ejemplos de otras aplicaciones:

- Riego
- Abastecimiento de agua y sistema de arreglo de aguas residuales.
- Industria
- Procesos Petro-químicos.
- Osmosis inversa en plantas de desalinización.
- Cancelado de gas.
- Minería

2.9 Bomba como turbina.

El empleo de bombas como turbinas para la generación de energía ha ganado interés a nivel mundial, especialmente en pico, micro y minicentrales hidroeléctricas. Esta opción se presenta como una alternativa más asequible en comparación con las turbinas convencionales, que suelen tener un costo elevado. Para reducir la inversión inicial en estas centrales, se opta por equipos sencillos, de fácil mantenimiento y con una mayor disponibilidad en el mercado (Carravetta et al., 2018).

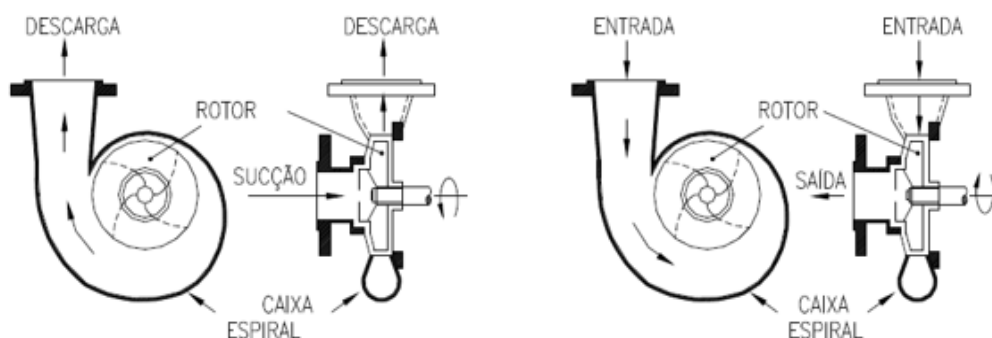
Como ventaja económica de esta alternativa de generación se tiene que existen pocos fabricantes de turbinas, lo que reduce el mercado del mismo. Se tiene mayor disponibilidad de bombas y sus componentes que para las turbinas, y finalmente presentan un mantenimiento relativamente sencillo debido a su construcción que no necesita mano de obra calificada para dichas labores. (Chapallaz et al., 1992) Procesamiento: (Gimena Castillo Pinares).

2.9.1 Componentes principales de una PAT:

Dependiendo de tipo de PAT los componentes de cada maquina son diferentes, en general los componentes de son clasificados en dos grupos: rotativa y estacionaria.

Figura 33

Bomba centrífuga funcionando como bomba y como turbina



Nota: Fuente: Carvalho Viana & Horta Nogueira (2002, p. 2)

2.9.1.1 La voluta:

A pesar de que la voluta de una PAT está diseñada para recolectar el agua que sale del impulsor, su diseño conserva cierta similitud a la voluta de una turbina Francis. Por ello cuando el flujo se invierte, la voluta de una PAT desempeña la función de distribuidor dirigiendo el flujo alrededor del impulsor. Sin embargo, la función más importante de una voluta es el equilibrar las fuerzas y la presión radial en el sistema.

2.9.1.2 El impulsor:

El impulsor es el elemento principal de una PAT, ya que se encarga de convertir la energía hidráulica del flujo de entrada en el eje mecánico. Aunque su diseño fue pensado para presurizar el líquido mediante la fuerza centrífuga, esto solo puede captar la energía del flujo con una eficiencia aceptable. Por lo general el impulsor cuenta con entre de 5 a 8 palas, con un tipo de forma de hidroala.

2.9.1.3 El tubo de aspiración:

Para reducir las pérdidas de energía en la salida de la PAT, es necesario mantener una baja cantidad de energía cinética. Mediante el uso de un tubo de aspiración, esta energía cinética puede transformarse en energía potencial. Por ello, el diseño del tubo de aspiración se

basa en optimizar la conversión de la velocidad en presión (según la ecuación de Bernoulli) (Carravetta et al., 2018, p. 30)

2.9.2 Tipos de bombas utilizadas en modo turbina.

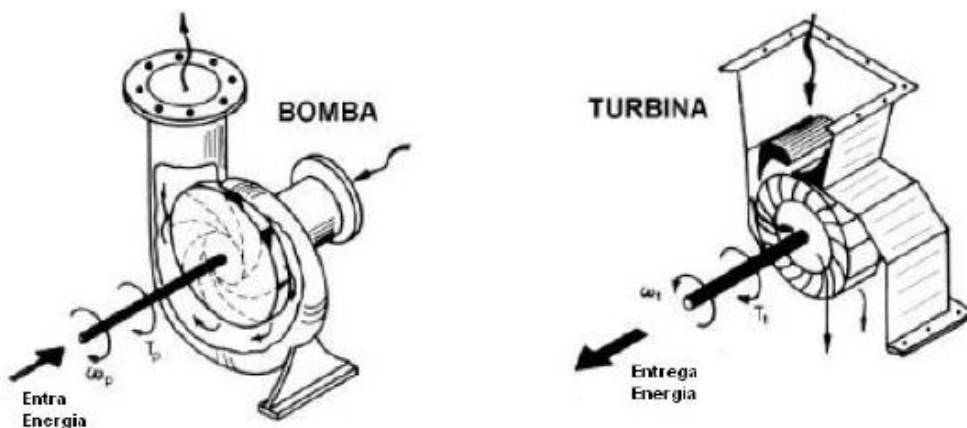
Las bombas son una alternativa económica a las turbinas tradicionales, porque son más baratas en comparación a una turbina convencional, además son fáciles de conseguir y mantener. Se puede utilizar cualquier tipo de bomba como turbina, sin embargo, es más beneficioso utilizar bombas centrífugas standard y bombas de flujo mixto.

2.10 Diferencias entre una bomba y una turbina.

La teoría hidráulica fundamental es común para ambas máquinas, pero las características del flujo real del fluido, como la fricción y la turbulencia, generan distintas directrices de diseño para bombas y turbinas.

Figura 34

Principal diferencia de fluido y flujo de energía en bombas y turbinas.



Nota: Fuente: Chapallaz et al. (1992, p. 9) Procesamiento: (Gimena Castillo Pinares)



Tabla 2

Diferencias entre una bomba y una turbina

	TURBINA	BOMBA
Flujo de energía	▪ La entrada de energía hidráulica es bajo presión de un fluido (agua). ▪ La salida de la energía es de tipo mecánica y a través del torque en el eje de la máquina.	▪ La entrada de la energía es de tipo mecánica y a través del torque en el eje de la máquina. ▪ La salida de la energía es de tipo hidráulica y por medio de un fluido bajo presión.
Altura de Presión Hidráulica	▪ La altura neta de la Turbina decrece (fricción fluida) con el aumento del caudal.	▪ La altura dinámica a ser generada por la bomba incrementa con el incremento del caudal.
Sentido de Rotación	El rotor de la turbina gira en dirección opuesta del impulsor de una bomba.	
Dirección del Torque	En ambos modos tienen la misma dirección.	

Nota: Fuente: Chapallaz et al. (1992, p. 9) Procesamiento: (Gimena Castillo Pinares)



3. CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LA DEMANDA DE ENERGÍA

3.1. Introducción.

3.1.1 Generación distribuida

La generación distribuida es la producción de energía eléctrica cercana al punto de consumo, conectada a la red de distribución. Se desarrolla a pequeña o mediana escala, principalmente mediante fuentes renovables como la solar, eólica, etc. Su objetivo es descentralizar la generación eléctrica, reduciendo pérdidas en transmisión, aumentando la eficiencia y promoviendo el acceso equitativo a la energía. En el Perú, un ejemplo de esta modalidad son los proyectos solares off-grid implementados en zonas rurales no conectadas al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN).

3.1.2 Régimen legal de la generación distribuida en el Perú

- Mencionada por primera vez en la **Ley N° 28832 (2006)**, pero **sin reglamentación vigente**.
- **Decreto Legislativo 1221 (2015)** permite a los usuarios con generación renovable inyectar excedentes a la red. Existen dos regímenes:
 - **Mediana escala:** Ley 28832
 - **Pequeña escala (micro generación):** D. Leg. 1221
- Proyectos de reglamento (2011 y 2018) no aprobados.
- El segundo propone **net-metering**, participación del distribuidor y créditos de energía por un año.

3.1.3 El autoconsumo como acceso al servicio público de electricidad

La generación distribuida no solo es técnica, sino una vía para garantizar derechos fundamentales. Promueve la democratización de la energía, la educación energética y el desarrollo local.

La generación distribuida es una forma eficiente y sostenible de empoderar al usuario, optimiza el acceso al servicio eléctrico y fortalece derechos fundamentales. Perú requiere un marco regulatorio claro que contemple:

- Aprobación automática para micro generación.
- Incentivos económicos y fiscales.
- Medidores inteligentes.
- Evitar tarifas que desincentiven la autogeneración.

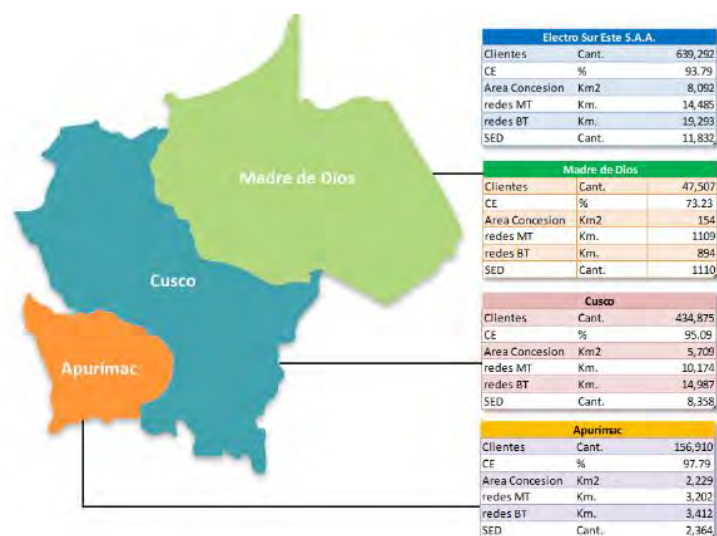
La generación distribuida es clave para un sistema eléctrico más democrático, sostenible y accesible.

3.2 Sistema eléctrico de Huaro-Quispicanchi

El área de concesión vigente de Electro Sur Este S.A.A. abarca las subregiones de Cusco, Apurímac, Madre de Dios, la provincia de Sucre en Ayacucho y el distrito de Cayarani, provincia Condesuyos en la región Arequipa, con un territorio total de 8,092 km². Esta concesión fue otorgada de manera definitiva para llevar a cabo actividades de distribución de energía eléctrica como servicio público, garantizando el suministro en áreas clave del sur del Perú.

Figura 35

Zona de Concesión - Electro Sur Este



Nota: Extraído de la Memoria Anual 2022 por Electro sur este (<https://else.com.pe/>)



Electro Sur Este S.A.A. es una empresa que atiende a más de 639,298 clientes, sus actividades más relevantes están relacionadas con sectores como el turismo y el comercio, mientras que la industria y la agricultura también juegan un papel importante, aunque en menor escala. Lo cual nos dice que la región en la que opera tiene una energía diversificada, con actividades enfocadas en la economía al servicio y desarrollo del turismo.

En la región del Cusco se atiende aproximadamente a 434,875 clientes en la zona donde más opera, por la cual es considerada el área más importante dentro de su red de distribución.

La segmentación de Electro Sur Este S.A.A. por sistemas eléctricos permite una aplicación adecuada del pliego tarifario en sus principales localidades. Las cuales son:

Tabla 3

Segmentación de Electro Sur Este S.A.A.

Código	ELSE-01	ELSE-08	ELSE-09 ^a
Denominación	Cusco	Abancay- Andahuaylas	Puerto Maldonado
Localidades	Cusco Ciudad, Corcha	Abancay- Andahuaylas	Puerto Maldonado Iñapari

Nota: Elaboración propia

3.3 Comportamiento del crecimiento poblacional

Para poder hacer un análisis del crecimiento poblacional tenemos que recurrir a datos otorgados por el INEI por el cual podremos analizar las principales características del crecimiento poblacional del distrito de Huaro. Podemos indicar que la población de la provincia de Quispicanchi pese a baja tasa de natalidad tuvo un crecimiento de 7% aproximadamente en los últimos 6 años, además podemos observar que la tasa de mortalidad y migraciones han intervenido de diferentes maneras estas influenciadas por hechos sociales, económicos y culturales.



Figura 36

Población Total de Quispicanchi 2018-2023

Provincia / Distrito	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Challabamba	9 488	9 468	9 421	9 398	9 379	9 364
Colquepata	9 004	8 973	8 915	8 883	8 858	8 836
Huancarani	7 689	7 788	7 866	7 923	7 966	8 001
Kosñipata	4 865	4 885	4 892	4 903	4 914	4 924
Quispicanchi	98 076	100 027	101 735	103 046	104 148	105 104
Urcos	11 785	11 984	12 152	12 279	12 416	12 538
Andahuaylillas	6 567	6 760	6 938	7 095	7 245	7 382
Camanti	2 502	2 556	2 603	2 638	2 668	2 692
Ccarhuayo	3 107	3 136	3 156	3 172	3 186	3 197
Ccatca	14 950	15 039	15 084	15 122	15 165	15 186
Cusipata	4 672	4 673	4 661	4 654	4 652	4 645
Huaro	4 860	4 919	4 965	5 000	5 032	5 055
Lucre	4 971	5 103	5 223	5 326	5 423	5 510
Marcapata	4 873	4 917	4 947	4 971	4 994	5 008
Ocongate	17 664	18 147	18 587	18 796	19 019	19 224
Oropesa	10 535	11 054	11 563	12 050	12 323	12 583
Quiquijana	11 590	11 739	11 856	11 943	12 025	12 084
Urubamba	67 545	68 877	70 043	70 938	71 691	72 344
Urubamba	22 637	23 222	23 754	24 178	24 550	24 885
Chinchero	11 761	12 043	12 298	12 498	12 671	12 825
Huayllabamba	6 062	6 192	6 308	6 395	6 467	6 529
Machupicchu	5 623	5 671	5 704	5 729	5 746	5 761
Maras	6 670	6 729	6 769	6 799	6 822	6 839
Ollantaytambo	11 447	11 642	11 808	11 918	12 000	12 061
Yucay	3 345	3 378	3 402	3 421	3 435	3 444

Nota: Extraído de Resultados definitivos Cusco por INEI (<https://www.inei.gob.pe>)

3.4. Análisis del coeficiente de electrificación

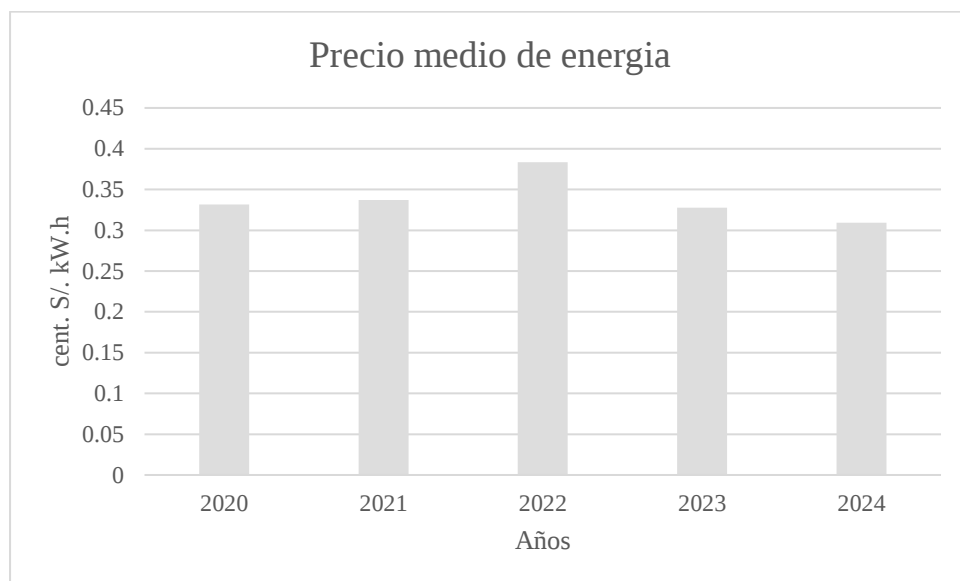
Durante el periodo 2018-2023, el coeficiente de electrificación en Quispicanchi ha mostrado un avance significativo que está siendo impulsado principalmente por políticas públicas como el Ministerio de Energías y Minas (MINEM) y programas de electrificación rural.

Las zonas rurales generalmente cuentan con una cobertura cercana al 100% a diferencia de las zonas rurales a las cuales las conexiones eléctricas son un desafío debido a la lejanía de estas y áreas montañosas, por lo cual se busca dar soluciones innovadoras.

Para el 2023 se estimó que el coeficiente de electrificación superó el 90%, en comparación al 2018. Sin embargo, aún queda trabajo por hacer en zonas de difícil acceso geográfico.

Figura 37

Variación del precio promedio de energía en el distrito de Huaro



Nota: Elaboración propia

3.5. Pliegos tarifarios en Huaro-Quispicanchi

Los pliegos tarifarios son definidos por Osinergmin (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería), los cuales son aplicados por la empresa Electro Sur este. Estos pliegos varían según el tipo de usuario (residencial, comercial, industrial, etc.) y el nivel de consumo.

Tarifas aplicadas en Quispicanchi (estimado 2023):

- Consumo básico (hasta 30 kWh/mes): Tarifas subsidiadas, cercanas a S/ 0.40 - S/ 0.45 por kWh.
- Consumo medio (30 a 100 kWh/mes): Aproximadamente entre S/ 0.50 - S/ 0.55 por kWh.
- Consumo alto (más de 100 kWh/mes): S/ 0.55 - S/ 0.60 por kWh, dependiendo del nivel de consumo.

A lo largo de los años 2020 – 2024 las tarifas fueron variando debido a la inflación y cambios en los costos de la energía a nivel nacional.



3.6 Procesos productivos de la transformación del maíz

El maíz es un producto muy versátil, (alimento humano, insumo industrial y fuente de energía). Para aprovechar al máximo su potencial, debe pasar a través de diversos procesos productivos de transformación, que convertirán la materia prima en productos de mayor valor agregado; estos procesos son:

- Proceso de selección de maíz por granos.
- Proceso de tostado de maíz.
- Proceso para harina de maíz.

3.6.1 Proceso de selección de maíz por granos

La selección de maíz por granos es una etapa clave dentro de la cadena de postcosecha que permite clasificar el grano según su tamaño, calidad y destino final.

El producto final se vende dependiendo de dichas características; los granos grandes son productos que se exportan a nivel mundial el cual es usado para consumo humano, snacks, consumo gourmet, o industrial. Los granos medianos, aunque no tengan el mismo valor de los granos grandes cuentan con múltiples usos en la alimentación humano, animal e industrial; se utilizan para la elaboración de harinas, cereales, almidón, además se utiliza para la elaboración de balanceados para consumo de animales debido a su alto contenido de almidón. Los granos pequeños son destinados principalmente a la alimentación de animales tales como, balanceados, piensos y consumo directo en granjas, al ser el producto de menor costo resultan económicos para pequeños y medianos productores pecuarios.



- a) **Desoje:** El proceso de desoje consta en retirar todas las hojas que cubren el producto dejando libre la mazorca. Este proceso es realizado por trabajadores en el lugar donde se encuentre el producto.



- b) **Secado:** Para el proceso de secado se tiene las mazorcas libres de hojas, las cuales normalmente tienen entre 20 – 30% de humedad. Este producto es transportado a las secadoras en las cuales las mazorcas se distribuyen de manera uniforme para que el secado se pueda realizar de manera uniforme.
- c) **Desgrane:** Este proceso se realiza cuando las mazorcas del maíz se encuentran secas, el maíz pasa a través de máquinas que utilizan rodillos, discos o tambores con dientes para separar los granos.
- d) **Selección:** La selección del maíz es un proceso por el cual el grano de maíz es separado por diferentes tamaños, se realiza a través de zarandas, las cuales suelen dividir el producto en 3 tamaños.

3.6.2 Proceso de tostado de maíz

El maíz tostado tiene gran aceptación como snack tradicional y saludable. Los cuales pueden ser comercializados en mercados locales, ferias gastronómicas, tiendas, supermercados, venta online y exportación. La venta del maíz tostado es una alternativa de emprendimiento rentable porque convierte un insumo básico en un producto de mayor valor en el mercado.



Continuando con el proceso de selección de maíz anteriormente mencionado, durante este proceso de tostado de maíz seleccionaremos los granos medianos.

- a) **Limpieza:** Cuando se tenga el producto separado se procederá a realizar una limpieza de polvo, restos de tusa, lo cual se desarrolla a través de una máquina lavadora la cual suele humedecer el producto para evitar que este se quiebre durante el proceso de tostado.
- b) **Tostado:** Para este proceso se utilizan tostadoras rotativas o de aire caliente y freidoras industriales, lo cual nos asegura un producto homogéneo en grandes volúmenes, este proceso puede durar entre 5 a 10 minutos.



- c) **Condimentado:** Luego de que el producto este correctamente tostado se le agrega algún condimento tales como; sal, mantequilla o especias para poder diversificar el producto (cancha salada, maíz dulce, picante, etc.)
- d) **Empaquetado:** Se empacan en bolsas plásticas o de papel metalizado para mantener frescura y crocancia. Además, se almacenan en lugares secos y frescos, ya que la absorción de humedad puede ablandar el grano tostado.

3.6.3 Proceso para harina de maíz

La venta de harina de maíz depende mucho del tipo de harina y del mercado al que está destinado, en el mercado local la venta se realiza en supermercados, bodegas, ferias; en el mercado industrial la venta está destinada a panaderías, fábricas de snacks, cervecerías y empresas de alimentos balanceados.



Continuando con el proceso de selección de maíz anteriormente mencionado, durante este proceso de tostado para transformar el maíz en harina utilizaremos los granos medianos.

- a) **Limpieza:** En este proceso se eliminan las impurezas (tusa, polvo, granos partidos) esto se suele realizar a través de las zarandas o aspiradores.
- b) **Molienda:** El maíz limpio ingresa a los molinos los cuales son de rodillos o martillos y obtenemos el producto convertido en harina.
- c) **Tamizado:** Luego de obtener la harina, este pasa a través de cribas las cuales separan las partículas grandes de las finas, se ajusta la granulometría según sea el destino (fina para panificación, más gruesa para polenta o arepas).
- d) **Empaquetado:** El producto ya tamizado se empaca en sacos de 25-50kg para industria o en bolsas pequeñas de 500 a 1kg para consumo directo, estos se almacenan en ambientes frescos y secos.

3.7 Maquinarias y equipos

La transformación de maíz requiere del uso de maquinarias y equipos especializados que garanticen eficiencia, calidad e inocuidad. Cada proceso productivo demanda tecnología para poder optimizar tiempos, reducir pérdidas y mantener las características nutritivas del maíz.

3.7.1 Máquina secadora de maíz

Eco Dry es una secadora de columna de flujo continuo, diseñado para el secado de productos húmedos para prepararlos para su almacenamiento o posterior procesamiento.

Sus principales características son: secado homogéneo, secado suave a altas temperaturas, diseño eficiente de conductos.

Figura 38

Máquina secadora de maíz



Nota: Extraído del catálogo de AqpSoluciones

(<https://larevista.aqpsoluciones.com/2018/08/13/clasificadora-de-granos/>)

Características de la máquina secadora de maíz

Potencia: 15 kW

3.7.2 Máquina desgranadora de maíz

La máquina desgranadora de maíz es un equipo agroindustrial diseñado para separar los granos de las mazorcas de manera rápida y eficiente. Estas máquinas emplean sistemas de rodillos, cilindros o discos con dientes y peines que desprenden el grano mediante fricción y presión, manteniendo su integridad.

Figura 39

Máquina desgranadora de maíz



Nota: Extraído del catálogo de Máquina Electro Perú

(<https://www.maquinaelectroperu.com/peruminox-dmb-500-com/peruminox-dmb-500-com-2/>)

Características de la maquina desgranadora de maíz.

Potencia: 4 HP

Capacidad: 600-800kg/h

3.7.3 Máquina eléctrica clasificadora de granos

Las Máquinas clasificadoras tienen un motor eléctrico que gira a velocidad constante de 300 rpm estas activan la biela manivela que produce un movimiento repetitivo a las cribas y esto logra que el maíz se acomode al alojamiento y se logren clasificar hasta 4 tamaños de granos.

Figura 40

Máquina eléctrica clasificadora de granos



Nota: Extraído del catálogo de AqpSoluciones

(<https://larevista.aqpsoluciones.com/2018/08/13/clasificadora-de-granos/>)

Características de la máquina eléctrica clasificadora de granos:

Modelo: CVG 50-100 AC

Potencia: 15HP

Nº de mallas: 4

Cap. X hora: 1000kg/hora

3.7.4 Lavadora de tambor rotatorio

Es una máquina de selección que lava a contracorriente, es decir el agua de limpieza entra en la lavadora del material y el material al tambor y se limpia en la colisión, la piel del material se quita y luego ace en el tambor y se descarga a través del tanque, el rodillo es hecho de la placa de acero de alta calidad por la punzonadora del CNC, durable.

Figura 41

Lavadora de tambor rotatorio



Nota: Extraído del catálogo de Starch Equipments (<https://spanish.starch-equipment.com/sale-12787536-stainless-steel-rotary-drum-washer-potato-starch-washing-machine.html>)

Características de la maquina lavadora de tambor rotatorio:

Potencia:	22kW
Capacidad:	20-50 t/h
Diámetro del tambor:	1905m m
Peso:	5730Kg

3.7.5 Freidor eléctrico

Máquina de acero inoxidable, para durabilidad, especialmente en ambientes de alta humedad o variaciones de temperatura, permite freír dos productos distintos al mismo tiempo, ocupa poco espacio vertical/horizontal comparado con freidoras de gran tamaño. La potencia requerida es suficiente para alcanzar temperaturas típicas de fritura de maíz

Figura 42

Freidor eléctrico



Nota: Extraído del catálogo de TwoThousand (<https://www.twothousand.com/2-x-8-liters-table-top-electric-commercial-double-deep-fryer-tt-we263c/>)

Características de la maquina freidora:

Potencia:	5.7 kW.
Capacidad de aceite:	16 Litros.
Peso Neto (sin aceite):	10 kg.

3.7.6 Molino de granos

Está diseñado para moler distintos tipos de granos. Con su motor y su capacidad, este molino garantiza eficiencia, rapidez y versatilidad, adaptándose a diferentes tipos de molienda con sus 6 zarandas intercambiables.

Figura 43

Molino de granos



Nota: Extraído del catálogo de AgroTech (<https://agrotech.pe/producto/molino-de-granos-250kg/>)

Características del molino:

Potencia: 4 HP

Capacidad: 250 kg/ Hr

3.7.7 Tamizador de harinas

Ideal para el tamizado de harinas, con la finalidad de obtenerse granulometrías altamente finas, y homogéneas.

Figura 44

Tamizador de harinas



Nota: Extraído del catálogo de Peruminox (<https://peruminox.pe/producto/tamizador-de-harinas/>)

Características del tamizador:

Potencia: 2 HP

Capacidad: 180- 200 kg/Hr

3.7.8 Selladoras para sacos

El modelo FRD-1200V está fabricado en acero inoxidable AISI 304 y permite sellar y codificar simultáneamente distintos tipos de bolsas plásticas. Dispone de un control de temperatura constante y una velocidad de sellado ajustable para adaptarse a las características de cada empaque.

Su sistema de impresión por tinta posibilita marcar en la bolsa información como fecha de producción, fecha de vencimiento y número de lote, entre otros datos.

Figura 45

Sellador para sacos



Nota: Extraído del catálogo de Simag (<https://www.simagindustrialperu.com/maquinas-selladoras-de-bolsas/selladora-de-bolsas-manual-a-pedal-continua-peru.html>)

Características del sellador para sacos:

Potencia: 1.34 kW

Capacidad de transporte: 20 kg

Ancho de sellado: 6-12 mm

3.8 Diagrama de carga y factor de carga

El diagrama de carga puede ser expresado numéricamente por el factor de carga (F_c), el cual estará dado por la relación entre la energía producida efectivamente y si la central trabaja a potencia máxima.

En una planta agroindustrial el diagrama de carga esta dado a través de una gráfica de como varia la potencia generada o la demanda a lo largo de un día, además en el diagrama podremos observar los picos de uso de energía.

La planta agroindustrial propuesta, será una planta que procese maíz en sus diferentes formas, de manera que estas generen mejores ingresos a los pobladores.



El equipamiento requerido para esta planta procesadora son las siguientes:

Tabla 4

Equipos requeridos para la planta procesadora.

Item	Denominación	Potencia (kW)
1	Maquina secadora	15
2	Maquina desgranadora	3
3	Maquina eléctrica clasificadora	11.2
4	Lavadora de tambor rotatorio	22
5	Freidor eléctrico	5.7
6	Molino de granos	3
7	Tamizador de harinas	1.5
8	Sellador para sacos	1.4

Nota: Elaboración propia

Todo el equipo correctamente instalado en la planta será el único que consuma la energía eléctrica generada por la central hidroeléctrica, la cual deberá satisfacer la demanda energética que esta requiera.

El objetivo es evidenciar la eficiencia de este sistema de abastecimiento eléctrico, procurando que el costo de la energía generada por la M.C.H. Urpay resulte competitivo frente a las tarifas de las redes comerciales.



El presente trabajo muestra las diferentes máquinas que forman parte de la planta procesadora de maíz y el consumo horario de energía, además incluye la energía requerida para la iluminación y otros.

Tabla 5

Carga diaria de las Máquinas a instalar en la planta procesadora.

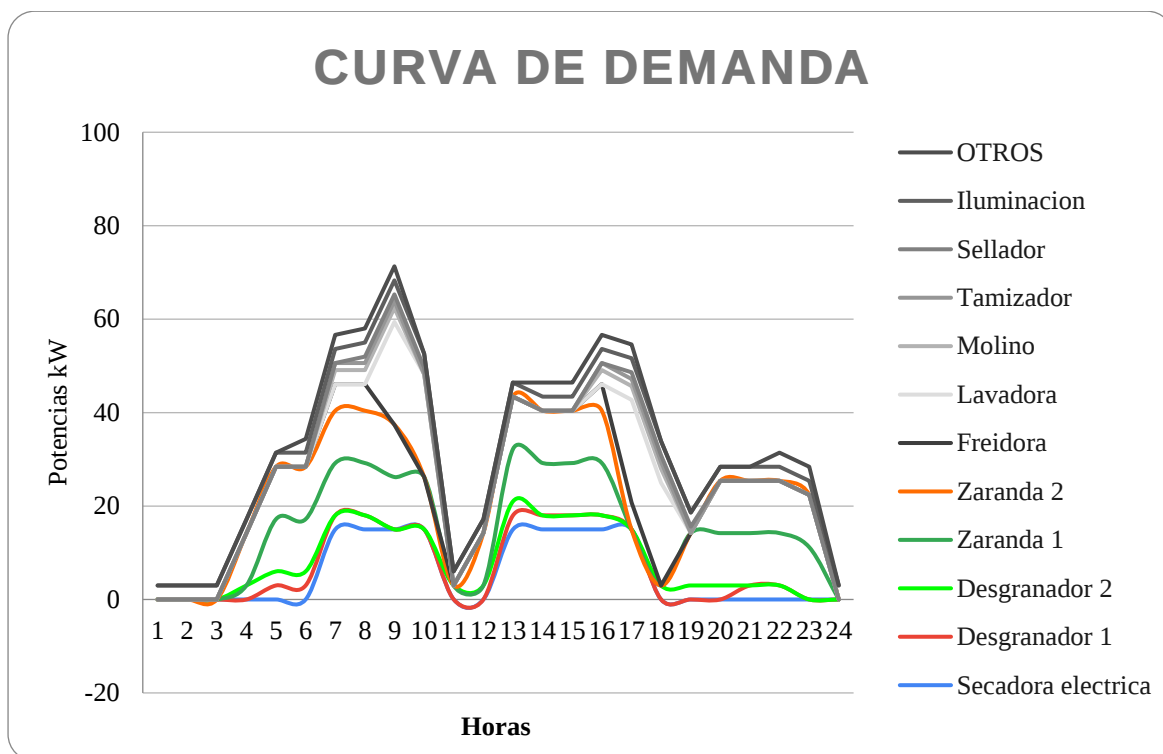
HORA	Secadora eléctrica	Desgranador 1	Desgranador 2	Zaranda 1	Zaranda 2	Freidora	Lavadora	Molino	Tamizador	Sellador	Iluminación	OTROS	TOTAL
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3
4	0	0	3	0	11.2	0	0	0	0	0	3	0	17.2
5	0	6	6	11.2	11.2	5.7	0	0	0	0	3	0	43.1
6	30	6	6	11.2	11.2	5.7	0	0	0	0	3	3	76.1
7	30	6	6	11.2	11.2	5.7	0	3	1.5	0	3	3	80.6
8	30	6	6	11.2	11.2	5.7	0	3	1.5	1.4	3	3	82
9	0	6	0	11.2	11.2	5.7	22	3	1.5	1.4	3	3	68
10	30	6	6	11.2	0	5.7	22	0	0	1.4	3	0	85.3
11	0	6	6	0	0	0	0	0	0	0	3	0	15
12	0	6	6	0	11.2	0	0	0	0	0	3	0	26.2
13	30	6	6	11.2	11.2	5	0	0	0	0	3	0	72.4
14	30	6	6	11.2	11.2	0	0	0	0	0	3	3	70.4
15	30	6	6	11.2	11.2	0	0	0	0	0	3	3	70.4
16	30	6	6	11.2	11.2	5.7	0	3	1.5	0	3	3	80.6
17	30	6	6	0	0	5.7	22	3	1.5	1.4	3	3	81.6
18	30	6	6	0	0	0	22	3	1.5	1.4	3	0	72.9
19	0	0	3	11.2	0	0	0	0	0	1.4	3	0	18.6
20	0	0	3	11.2	11.2	0	0	0	0	0	3	0	28.4
21	0	3	0	11.2	11.2	0	0	0	0	0	3	0	28.4
22	0	3	0	11.2	11.2	0	0	0	0	0	3	3	31.4
23	0	0	0	11.2	11.2	0	0	0	0	0	3	3	28.4
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3
ENERGÍA TOTAL EN KW													1089.0

Nota: Elaboración propia

El cuadro anterior, representado en un diagrama de carga diario, refleja el uso de las máquinas, sus horarios de funcionamiento y el consumo de energía de la planta durante una jornada típica de trabajo.

Figura 46

Diagrama de la curva de demanda de energía.



Nota: Elaboración propia

Tabla 6

Datos de equipamiento de la planta procesadora.

DATOS DE EQUIPAMIENTO		
Potencia instalada	100	kW
Potencia máxima	85.3	kW
Energía consumida	1089	kW-Hora

Nota: Elaboración propia

Parámetros de demanda

- Energía consumida (E en kW-h): Es la energía consumida por la carga en el periodo de un día.



- Potencia media (P_{med} en kW): Es la energía consumida durante un día dividida entre las 24 horas de operación.
- Potencia máxima (P_{max} en kW): Es la máxima potencia demandada en un cierto instante del de trabajo.
- Potencia mínima (P_{min} en kW): Es la mínima potencia alcanzada en un instante del día.
- Potencia instalada (P_i en kW): Es la suma de la potencia de los grupos instalados.
- Factor de Carga (F_c): Es la relación de la demanda media y la demanda máxima registrada en un periodo de tiempo.

Tabla 7

Parámetros de la planta procesadora

PARAMETROS DE DEMANDA		
Potencia Instalada (kW)		100
Potencia Máxima (kW)		85.30
Potencia Mínima (kW)		3.00
Potencia Media	$P_{med} =$	45.38
Factor De Carga	$F_c =$	0.53
Factor De Planta	$F_p =$	0.45
Duración	Horas útiles=	12.77

Nota: Elaboración propia



4. CAPÍTULO IV: OBRAS MECÁNICAS DE LA M.C.H. URPAY

4.1. Introducción.

La Mini Central Hidroeléctrica de Urpay estaba implementada con equipamiento electromecánico cuando se encontraba en funcionamiento. Actualmente solo podemos observar la tubería de presión, que se encuentra en un estado de abandono y no funcional. Por lo cual se realizará un nuevo cálculo para dicho componente.

Dentro de las obras mecánicas se realizan el diseño y la selección de equipos mecánicos, los cuales forman parte de la central de generación hidráulica.

Parámetros de diseño:

Mediante los cálculos realizados en capítulos pasados logramos determinar resultados y parámetros para el funcionamiento de la Mini Central Hidroeléctrica de Urpay, los cuales usaremos para determinar nuevos cálculos.

Tabla 8

Parámetros de la mini central hidroeléctrica de Urpay para 2 grupos hidroeléctricos.

Caudal	0.2	m ³ /s
Altura bruta	107.81	m
Altura neta	100	m
Potencia	100	kW

Nota: Elaboración propia

A través de estos parámetros de diseño podremos efectuar el cálculo de ingeniería de obras electromecánicas.

4.2 Tubería de presión

El conducto forzado o tubería de presión conecta la cámara de carga con las PATs ubicadas en la casa de máquinas.

En la M.C.H. Urpay, este conducto llega hasta la casa de máquinas y se encuentra bridado, permitiendo su acoplamiento directo a la PAT.



El tubo, fabricado en acero rolado, está diseñado para resistir esfuerzos de tracción y compresión generados por la dilatación o contracción térmica, así como por su propio peso durante el transporte.

Cuenta con acabados que permiten la unión mediante bridas y presenta resistencia a la corrosión provocada por gases disueltos o por la presencia de sustancias ácidas o básicas en el agua.

Además, debe poseer la elasticidad necesaria para soportar variaciones bruscas de presión, como las producidas por el golpe de ariete. El conducto forzado se adapta al terreno siguiendo la pendiente correspondiente. Los codos de la tubería están sometidos a esfuerzos adicionales debido a la desviación del flujo interno del agua.

Los apoyos simples del conducto se componen de bloques de concreto, que permiten ligeros desplazamientos longitudinales del tubo y están equipados con cintas de fijación ancladas al zócalo.

La profundidad de cimentación de estos soportes garantiza la estabilidad total, evitando cualquier tipo de deslizamiento.

Finalmente, el conducto forzado ha sido fabricado conforme a los cálculos hidráulicos y estructurales, los cuales serán verificados en el presente capítulo.

4.3 Cálculo y dimensionamiento hidráulico

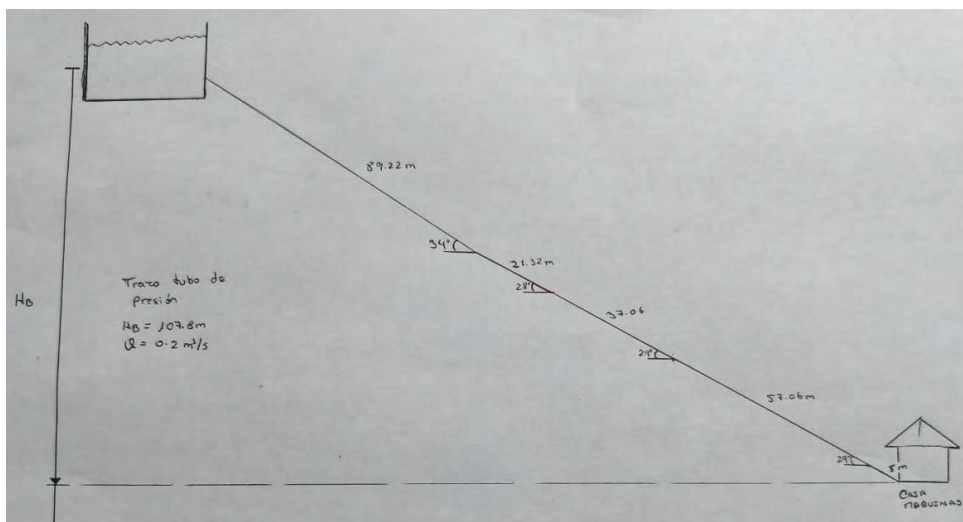
La tubería de presión conecta la cámara de carga con la PAT, adaptándose al perfil del terreno y soportando todos los esfuerzos mecánicos que puedan presentarse durante su funcionamiento.

Los cálculos hidráulicos y mecánicos necesarios para la verificación de la tubería de presión y las condiciones hidráulicas de operación de la M.C.H. Urpay han sido desarrollados en una hoja de cálculo, cuyos resultados se presentan en el cuadro de dimensionamiento hidráulico.



Figura 47

Croquis de la tubería de presión



Nota: Elaboración propia

Tabla 9

Condiciones de operación de la M.C.H. Urpay

DESCRIPCION	Notación	Unidades	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5
Altura bruta	Hb	m	49.270	10.010	18.170	27.910	2.450
Altura bruta acumulada	Hb	m	49.270	59.280	77.450	105.360	107.810
Longitud de tramo	Lt	m	89.220	21.320	37.060	57.060	5.000
Longitud acumulada	Lta	m	89.220	110.540	147.600	204.660	209.660
Caudal	Q	m ³	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
Diámetro interior de tubería	D	m	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
Peso específico H2O	ρ	kg/m ³	1.0E+03	1.0E+03	1.0E+03	1.0E+03	1.0E+03
Aceleración de la gravedad	g	m/s ²	9.807	9.807	9.807	9.807	9.807
Celeridad sonido en el agua	a	m/s	1420	1420	1420	1420	1420
Módulo de compresión H2O	ξ	kg/mm ²	2.06E+02	2.06E+02	2.06E+02	2.06E+02	2.06E+02
Módulo de elasticidad acero	E	kg/mm ²	2.10E+04	2.10E+04	2.10E+04	2.10E+04	2.10E+04
Resistencia a la tracción acero	Sd	kg/mm ²	40.800	40.800	40.800	40.800	40.800
Eficiencia de soldadura	η_s		0.850	0.850	0.850	0.850	0.850
Coeficiente de seguridad	CS		2.500	2.500	2.500	2.500	2.500
Espesor adicional corrosión/20 años	k	mm	3.000	2.500	2.500	2.500	2.500
Temperatura de diseño	Tm	°C	13.000	13.000	13.000	13.000	13.000
Viscosidad cinemática H2O (Tabla V)	v	m ² /s	1.004E-06	1.004E-06	1.004E-06	1.004E-06	1.004E-06
Rugosidad absoluta	e	mm	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
Coeficiente del material tubo (Tabla III)	K		1.400	1.400	1.400	1.400	1.400
Coeficiente de dilatación del acero	cd	m/m°C	1.50E-05	1.50E-05	1.50E-05	1.50E-05	1.50E-05
Densidad del acero	d	kgf/m ³	7.90E+03	7.90E+03	7.90E+03	7.90E+03	7.90E+03
Velocidad después maniobra cierre	V1	m/s	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000



Coeficiente perdidas entrada	K1	0.200	0.000	0.000	0.000	0.000
Coeficiente perdidas rejilla	K2	0.136	0.000	0.000	0.000	0.000
Coeficiente de perdidas en codos	K3	0.000	0.206	0.162	0.058	0.026
Área interior de tubo	m2	0.071	0.071	0.071	0.071	0.071

Nota: Elaboración Propia

4.3.1 Factores para el diseño y selección de la tubería de presión

Se tomará en cuenta los siguientes factores:

- Presión de diseño para cada tramo de tubería
- Tipo de unión entre cada tramo
- Diámetro y perdida por fricción
- Condiciones mecánicas del tipo de suelo
- Condiciones Climáticas

Tabla 10

Parámetros para el dimensionamiento hidráulico.

DESCRIPCION	Notación	Unidades	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5
Tipo de tubería	Tt		Baja Pres.	Alta Pres.	Alta Pres.	Alta Pres.	Alta Pres.
Velocidad de régimen	Vo	m/s	2.829	2.829	2.829	2.829	2.829
Diámetro exterior de tubería	De	m	0.313	0.313	0.313	0.319	0.319
Velocidad media dentro tubo	V	m/s	2.829	2.829	2.829	2.829	2.829
Relación e/E	e/E	kg/mm2	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
Relación D/es	D/es	m/m	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000
Relación V/g	V/g	s	0.289	0.289	0.289	0.289	0.289
Celeridad onda en el agua	C	m/s	1248.169	1248.169	1248.169	1248.169	1248.169
Altura presión dinámica	Pd	mca	37.217	37.217	37.217	37.217	37.217
Altura presión dinámica (50%) Hb	Pd	mca	24.635	29.640	38.725	52.680	53.905
Altura de presión total	Hmax	m	73.905	88.920	116.175	158.040	161.715
Presión total en la tubería	Pt	kg/m2	7.39E+04	8.89E+04	1.16E+05	1.58E+05	1.62E+05
Presión total en la tubería	Pt	kg/mm2	0.074	0.089	0.116	0.158	0.162
Presión total en la tubería	Pt	Bar	7.248	8.720	11.393	15.498	15.859
Presión manométrica	Pm	lb/pulg2	69.937	84.146	109.938	149.555	153.033

Nota: Elaboración Propia



4.3.2 Selección del material de la Tubería Forzada

En las tuberías sometidas a altas presiones, es fundamental seleccionar el material más apropiado, ya que la longitud del conducto y su elevado costo influyen de manera significativa en la inversión total del proyecto. La tubería se considera de alta presión cuando cumple con la ecuación establecida; de lo contrario, se clasifica como de baja presión.

$$\frac{Hb}{(Qd)^{\frac{1}{3}}} \geq 100 \quad (4.1)$$

Donde:

Hb (altura bruta) = 107.81 metros

Qd (caudal de diseño) = 0.2 m³/s.

En nuestros cálculos nos da como resultado 189.8, por lo cual esto nos indica que es una instalación de alta presión, por ende, los mejores materiales para dichos fines serían:

- Acero estructural laminado
- Hierro dúctil fundido centrifugado
- Acero fundido (fundición centrifugada)

Para la M.C.H. Urpay la tubería de presión será un tubo de acero negro sin costura SCH40, las normas para dicha tubería son:

- A53
- ASTM A106
- API 5L grado B

Resistencia a la Tracción, min 60000 PSI (415 MPa)

Fluencia, min 35000 PSI (240 MPa)

4.4 Número de tuberías

a) Número de tuberías

La cantidad de tuberías a instalar se determina en función del número de grupos generadores que se vayan a implementar.



En este caso seleccionaremos un tubo de:

Tipo de tubería = Tubo de acero negro sin costura

Velocidad de régimen = 3 m/s (recomendado)

2.829 m/s (hallado)

b) Selección del diámetro adecuado

A partir de la ecuación de continuidad del caudal, el diámetro de la tubería se determina mediante la siguiente expresión:

$$D = 1.13 \sqrt{\left(\frac{Q}{v}\right)} \quad (4.2)$$

Donde:

D = Diámetro (m)

Qd = Caudal de diseño 0.2 m³/seg

v = Velocidad dentro del tubo 2.829 m/s.

Remplazando los valores mostrados obtenemos:

D = 0.3 m que equivale a 11.8”

El diámetro interior del tubo encontrado es de 12 pulgadas que equivale a 0.3048 metros, lo que confirma que el diámetro actual es lo recomendado.

4.5 Cálculo del espesor del tubo (t)

Para poder realizar el cálculo del espesor del tubo se considera las siguientes condiciones de operación:

Caudal de diseño (Qd)	0.2 m/s
Longitud tubería (Lt)	209.660 m
Altura bruta (Hb)	107.81 m
Altura dinámica	53.905 m
Altura max.(Hx)	161.715 m
Esfuerzo de diseño (Sd)	40.8 kg/mm ²



Eficiencia de soldadura (η_s) 0.85

La altura máxima (H_x) incorpora un factor de seguridad para cubrir las sobrepresiones generadas por el golpe de ariete. Por ello, en el diseño se determinará el espesor de la tubería utilizando H_x , equivalente a la suma de la altura estática correspondiente a la altura bruta más la altura dinámica (h_{max}) producida por dicho golpe de ariete.

$$H_x = H_b + h_{max} \quad (4.3)$$

Por consiguiente, cumple también que:

Presión total = Presión estática + Presión dinámica

La presión dinámica corresponde a la presión generada en la tubería por el golpe de ariete, el cual ocurre debido al cierre o apertura de una válvula u otro dispositivo de control de flujo.

$$P_d = \delta * h_d \quad (4.4)$$

La presión dinámica está dada por la fórmula siguiente:

$$P_d = \delta * \frac{C * V}{g} \quad (4.5)$$

Donde:

- P_d : Máxima sobre presión producida por cierre brusco o instantáneo (mca)
- C : Celeridad de las ondas o velocidad de propagación de las mismas a lo largo de la tubería (m/seg).
- V : ($V_0 - V_1$) Velocidad media del agua dentro de la tubería.
- V_0 : Velocidad régimen de régimen.
- V_1 : Velocidad final después de la maniobra de cierre
- g : Aceleración de la gravedad (9.8 m/seg²).

$$C = \frac{a}{(1 + \frac{\epsilon D}{E e})^{1/2}} \quad (4.6)$$

Donde:



a (m/seg): Celeridad de propagación del sonido en el agua.

ξ (Kg/mm²): Modulo de elasticidad del agua.

E (Kg/mm²): Modulo de elasticidad del acero.

D (m): Diámetro interno de la tubería.

e (m): Espesor mínimo según la tabla.

La relación La relación ε/E vale como término medio:

Tubería de acero 0.01

Tubería de fundición 0.02

$$P_d = \delta \frac{(V_0 - V_1)}{g} * \frac{a}{(1 + \frac{\varepsilon}{E} + \frac{D}{e})^{\frac{1}{2}}} \quad (4.7)$$

Esta presión dinámica, expresada como altura dinámica, corresponde a una h_{max} de aproximadamente 37.2 m. La sobrepresión obtenida se considera aceptable, ya que se ha evaluado bajo condiciones extremas, como el cierre brusco y una velocidad de 0 m/s en el cierre total.

Cálculo del espesor del tubo:

$$t = (P \frac{D}{2} * \frac{1}{S_d} * \frac{1}{\eta_s} + 0.004) * 1000 \quad (4.8)$$

Donde:

P (kg/m²): Presión total.

ρ (Kg/m³): Peso específico del agua.

S_d (kg/mm²): Esfuerzo de diseño del acero.

η_s : Eficiencia de la soldadura 0.85

Para las condiciones de la M.C.H. Urpay, se obtuvo un espesor de 4.209, debido a las normas aplicadas en las centrales hidroeléctricas se usará la medida mínima 6 mm mínimo.



Tabla 11

Cálculo y verificación del espesor de la tubería

DESCRIPCION	Notación	Unidades	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5
CALCULO TUBERIA ACERO							
Espesor de la tubería	t	mm	3.799	3.462	3.756	4.209	4.209
Espesor de la tubería	t	pulg.	1/4	1/4	1/4	3/8	3/8
Espesor normalizado de tubería	t	mm	6.350	6.350	6.350	9.525	9.525
Coefficiente de seguridad de diseño	Cs	mm	5.014	4.586	4.226	5.658	5.658
SELECCIÓN DE TIPO DE TUBERIA							
Tipo de tubería a utilizar			SCH40	SCH40	SCH40	SCH40	SCH40
Espesor de la tubería seleccionada	t(sel)	mm	6.350	6.350	6.350	9.525	9.525
Espesor de la tubería seleccionada	t(sel)	pulg.	1/4	1/4	1/4	3/8	3/8
Presión de trabajo permitida	Pt	kg/mm2	0.396	0.396	0.396	0.664	0.664
Presión de trabajo permitida	Pt	bar	38.875	38.875	38.875	65.142	65.142
Presión de trabajo permitida	Pt	mca	397.209	397.209	397.209	665.594	665.594
Verificación de presión de trabajo			ok	ok	ok	ok	ok

Nota: Elaboración Propia

Figura 48

Tubería de presión existente de la M.C.H. Urpay



Nota: Fotografía propia



4.6 Cálculo de pérdidas de carga

La caída neta se obtiene restando de la caída bruta todas las pérdidas de carga generadas por la fricción en los distintos elementos que el agua atraviesa, como la entrada con rejilla, la geometría de la boca de entrada, la fricción en la tubería, los accesorios, las reducciones, la válvula y otros componentes del sistema.

Las ecuaciones utilizadas son de G. Zopetti.

$$H_n = H_b - \Sigma \Delta h_f \quad (4.9)$$

El recorrido del agua hacia la bomba iniciara desde la cámara de carga y se calculan las siguientes pérdidas.

- Pérdidas en la entrada a la tubería de presión.
- Pérdidas en la rejilla.
- Pérdidas por fricción en el tubo
- Pérdidas en codos
- Pérdidas en Reducción.
- Pérdidas en válvula principal.

4.6.1 Pérdidas en la entrada de agua en la tubería

El agua permanece en reposo dentro de la cámara de carga y, para ingresar a la tubería, primero debe adquirir una velocidad correspondiente a la altura de columna de agua necesaria para generar dicho movimiento (velocidad).

$$\Delta h_{f_1} = \frac{(k_1 * v^2)}{(2 * g)} \quad (4.10)$$

Donde:

- Δh_{f_1} : Pérdidas en la entrada en m.
- k_1 : Coeficiente de pérdidas 0.20
- v : Velocidad del agua en la tubería (2.829 m/s).
- g : Aceleración de la gravedad (9.81m/s²).



4.6.2 Pérdida en la rejilla

En esta ocasión se utilizará la fórmula de Kirschmer, la cual es usada para este tipo de perdidas, y está definida de la siguiente manera:

$$\Delta h f_2 = \frac{(k_2 * v^2)}{(2 * g)} \quad (4.11)$$

Donde:

- $\Delta h f_2$: Pérdidas de la rejilla en metros.
- k_2 : Coeficiente de pérdidas 0.136
- v : Velocidad del agua en la tubería (2.829m/s).
- g : Aceleración de la gravedad (9.81m/s²).

Para el cálculo del coeficiente de perdidas:

$$k_2 = \beta * \text{sen} \alpha * (d/a)^{4/3} \quad (4.12)$$

Donde:

- β : Coeficiente de la forma de las barras de la rejilla 1.03.
- α : Angulo de inclinación contra la horizontal 60°
- d : Separación entre barras 25.4 mm.
- a : Espesor de la barra 6.35 mm.

4.6.3 Pérdida por fricción en el tubo

La fórmula que utilizaremos, será la ecuación de Darcy la cual es la siguiente:

$$\Delta H f_3 = \tau \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad (4.13)$$

- $\Delta h f_3$: Perdidas por fricción en tubería en metros.
- τ : Coeficiente de pérdida (0,01 (k / d) 0,314



- L: Longitud de la Tubería (se calcula por tramos en m)
- D: Diámetro interior de la tubería (0.3 m)
- K: Coeficiente del material del tubo. (k = 1.5)

4.6.4 Pérdida en codos

$$\Delta h_{f_4} = \tau * \frac{v^2}{2 * g} \quad (4.14)$$

Donde:

- Δh_{f_4} : Perdidas en codos en metros.
- τ : Coeficiente que depende de ángulo de codo.
- v : velocidad de régimen en (2.829 m/s).

Las pérdidas en los codos están determinadas por el ángulo de desviación que se produce en el cambio de dirección del flujo, cuyos valores se presentan en el siguiente cuadro:

Tabla 12

Valores del ángulo de desviación.

Angulo	10°	15°	22.5°	30°	45°	60°	90°
τ	0.044	0.062	0.154	0.165	0.320	0.684	1.265

Nota: Elaboración Propia

A lo largo de nuestra tubería los ángulos serán los que definan los cambios en cada tramo resultando 4 codos, el coeficiente de perdida será determinado interpolando los ángulos de la tubería:

34°	=> 0.206
28°	=> 0.162
29°	=> 0.1635
29°	=> 0.1635



4.6.5 Pérdidas totales

La tubería de presión en Urpay consta únicamente de 5 tramos y puede considerarse prácticamente recta, presentando solo ligeras desviaciones para adecuarse al relieve del terreno en su descenso hacia la Casa de Máquinas. Como resultado del cálculo de las pérdidas de carga primarias y secundarias, se obtiene lo siguiente:

Un total de 3.674 m, que comparada con la longitud del tubo la cual es de 209.66 m, la pérdida llega a ser aproximadamente el 2%.

Tabla 13

Cálculo de pérdidas de carga.

DESCRIPCION	Notación	Unidades	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5
Número de Reynolds	R		8.45E+05	8.45E+05	8.45E+05	8.45E+05	8.45E+05
Tipo de flujo en la tubería	Tf		Turbulento	Turbulento	Turbulento	Turbulento	Turbulento
Rugosidad relativa	e/D	m	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023
Coeficiente de fricción	f		0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
Pérdidas a la entrada	Δh_{f1}	m	0.082	0.000	0.000	0.000	0.000
Pérdidas en la rejilla	Δh_{f2}	m	0.056	0.000	0.000	0.000	0.000
Pérdidas por fricción método de Darcy	Δh_{f3}	m	1.969	0.471	0.818	1.259	0.110
Pérdidas por codos	Δh_{f4}	m	0.000	0.084	0.066	0.024	0.011
Pérdida por estrechamiento repentino	Δh_{f5}	m		0.000	0.000	0.000	0.000
Pérdidas por transición	Δh_{f6}	m		0.000	0.000	0.000	0.000
Pérdidas en válvula	Δh_{f7}	m		0.000	0.000	0.000	0.008
Pérdidas por tramo de tubo	Σh_f	m	2.106	0.555	0.884	1.283	0.129
Sumatoria de pérdidas	Σh_f	m	2.106	2.661	3.545	3.944	3.674
Diferencia de altura	(Hb-Sp)	m					104.136

Nota: Elaboración Propia

Esta corresponde a la altura de salto disponible en la tubería; a esta longitud se le añade la altura del espejo de agua, medida desde el nivel del agua en la cámara de carga hasta el nivel de descarga.



4.7 Verificación de esfuerzos en el tubo

4.7.1 Esfuerzo longitudinal

El esfuerzo longitudinal que soporta el tubo está dado por:

$$S_x = \frac{P * D}{4 * t} \quad (4.15)$$

Donde:

- S_x : esfuerzo longitudinal en el tubo (kg/mm^2)
- P : Presión total de trabajo (189 mca)
- D : Diámetro de la tubería (0.3 m)
- t : Espesor del tubo (mm)

Obtenemos: $S_x = 1.372 \text{ kg/mm}^2$, que es el más alto y se encuentra en el tercer tramo de la tubería.

4.7.2 Esfuerzo tangencial

El esfuerzo tangencial que está actuando en la tubería esta dado por:

$$S_y = \frac{P * D}{2 * t} \quad (4.16)$$

Usando los datos de la tubería se obtiene: $S_y = 2.744 \text{ kg/mm}^2$, que es el más alto y se encuentra en el tercer tramo.

Tanto el esfuerzo longitudinal como el tangencial deben mantenerse por debajo del límite de tracción del material de la tubería. En este caso, los valores obtenidos $S_x = 1.372 \text{ kg/mm}^2$ y $S_y = 2.744 \text{ kg/mm}^2$ son inferiores a los $40,80 \text{ kg/mm}^2$, que corresponden a la resistencia a la tracción del acero normalizado utilizado en la tubería.

En la tubería de presión de la M.C.H. Urpay, la pendiente es considerablemente pronunciada. La tubería actualmente instalada cuenta con apoyos simples ubicados cada 5 metros, separación que ha sido determinada para garantizar que los esfuerzos de flexión sean adecuadamente soportados.



4.8 Juntas de dilatación

Permite que la tubería se dilate longitudinalmente debido al efecto del calor, evitando así deformaciones y esfuerzos adicionales que aparecerían si este elemento no se instalara.

$$\Delta l = \alpha * L_d * \Delta T \quad (4.18)$$

Donde:

- Δl : Dilatación longitudinal debido al cambio de temperatura (mm).
- α : Coeficiente de dilatación térmica (m/m°C).
- L_d : Longitud de la tubería entre dos juntas de dilatación (m).
- ΔT : Variación de temperatura (20 °C).

La dilatación provocada por las variaciones de temperatura debe ser absorbida por las juntas de dilatación. Se ha considerado que, cuando la dilatación lineal supera los 15 mm, se debe incluir una junta de dilatación o de montaje. En el tramo 1, que es el de mayor longitud, es donde se presenta la mayor dilatación lineal.

Las dilataciones son compensadas mediante las empaquetaduras ubicadas en las bridas, las cuales tendrán un espesor de 4 mm. Asimismo, se instalaron juntas de dilatación en cada cambio de dirección.

Tabla 14

Verificación de los esfuerzos en la tubería de presión.

DESCRIPCION	Notación	Unidades	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5
Dilatación lineal	E	mm	17.398	4.157	7.227	11.127	0.975
Esfuerzo longitudinal	Sx	kg/mm2	0.873	1.050	1.372	1.244	1.273
Esfuerzo tangencial	Sy	kg/mm2	1.746	2.100	2.744	2.489	2.547
Resistencia tracción > Esfuerzos	Sy<Sd		ok	ok	ok	ok	ok
Fuerza longitudinal	Fx	kg	5.22E+03	6.29E+03	8.21E+03	1.12E+04	1.14E+04
Fuerza tangencial	Fy	kg	5.32E+03	6.40E+03	8.36E+03	1.14E+04	1.16E+04
Sección de abrazadera	Ab	mm2	65.210	78.459	102.507	139.447	142.690

Nota: Elaboración Propia



4.9 Bridas

Para seleccionar las bridas adecuadas se recurre a las tablas de productos de los distintos proveedores. En este caso, las características de las bridas en diámetros comerciales, lo que permite elegir los componentes necesarios en función del diámetro de la tubería, que es de 12 pulgadas.

Figura 49

Características de las bridas a partir del diámetro de la tubería.

Medida Nominal		Dia. Exterior de Brida (O)	Espesor de Brida (C)	Dia. del Eje a la Base (X)	Dia. del Eje a los Agujeros (K)	Largo a través de Eje (Y)	Raised Face (RF)	Dia. de Raised Face (R)	Dia. de Agujero (B)	Dia. Agujeros	Núm. de Agujeros	Kgs. Aprox.
(pulg)	(mm)											
1/2"	12	88.9	11.1	30.2	60.4	15.7	1.5	35.0	22.3	15.7	4	0.47
3/4"	18	98.5	12.7	38.1	69.8	15.7	1.5	42.9	27.6	15.7	4	0.59
1"	25	107.9	14.2	49.2	79.2	17.5	1.5	50.8	34.5	15.7	4	0.86
12"	300	482.6	31.7	365.2	431.8	55.6	1.5	381.0	327.1	25.4	12	27.68
14"	350	533.4	35.0	400.0	476.2	57.1	1.5	412.7	359.1	28.4	12	35.20
16"	400	596.9	36.5	457.2	539.7	63.5	1.5	469.9	410.4	28.4	16	42.18
18"	450	635.0	39.6	504.9	577.8	68.3	1.5	533.4	461.7	31.7	16	49.71

Nota: Extraído del catálogo de Fiorella Representaciones (<https://www.fiorellarepre.com.pe/>)

4.10 Metodología elección de PAT

4.10.1 Metodología y autores

El método más común para predecir las curvas de rendimiento en modo turbina (PAT) es la conversión a partir de las curvas de bomba estándar, utilizando factores Childs (1962), Derakhshan & Nourbakhsh (2008) son referentes en este campo.

La idea central detrás de estas correlaciones es que, si conocemos el punto de mejor eficiencia (BEP) de una bomba operando en modo bomba ($H_{B,BEP}$, $Q_{B,BEP}$, $N_{B,BEP}$, $\eta_{B,BEP}$), podemos estimar el punto de mejor eficiencia (BEP) de la misma bomba operando en modo turbina ($H_{T,BEP}$, $Q_{T,BEP}$, $N_{T,BEP}$, $\eta_{T,BEP}$), a través de relaciones empíricas o semi-empíricas. Estas relaciones se basan en el principio de similitud y en la observación de numerosos datos experimentales. El propósito de esta memoria de cálculo es establecer un procedimiento sistemático para la selección de una bomba centrífuga comercial destinada a operar en modo



inverso como turbina (PAT). Dado que los fabricantes de bombas no suelen proporcionar las curvas de rendimiento para la operación en modo turbina, es necesario emplear métodos de predicción para estimar el punto de operación inverso a partir de los datos de bombeo. Este documento detalla varios métodos empíricos reconocidos en la literatura técnica para facilitar este proceso.

4.11 Autores, métodos y correlaciones adicionales para la predicción de rendimiento de PATs

Numerosos investigadores han propuesto modelos y correlaciones para predecir el comportamiento de las PATs. A continuación, se presentan algunos autores clave y una descripción general de sus enfoques:

- **Stepanoff (1993):** Considerado uno de los pioneros en el estudio del comportamiento de bombas operando en turbina. Sus correlaciones, aunque más antiguas, sentaron las bases para trabajos posteriores y exploraron las relaciones fundamentales para la conversión de curvas de bomba a turbina.
- **Al-Ghouti (1993):** Desarrollo correlaciones que buscan predecir el punto de operación Fiorella optimo de la turbina basándose en el BEP de la bomba. Sus modelos a menudo se presentan como relaciones adimensionales entre los valores de altura, caudal y velocidad.
- **Grover (2009):** Propuso modelos que correlacionan los puntos de operación de la bomba y la turbina, con el enfoque particular en la optimización y la selección de la PAT. Sus investigaciones suelen centrarse en la predicción de rendimiento y eficiencia.
- **Yang et al. (2012):** Investigadores más recientes que han empleado métodos avanzados, incluyendo simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD) y algoritmos de optimización, para desarrollar correlaciones más precisas y para comprender el flujo



interno en las PATs. Sus trabajos a menudo se enfocan en bombas de alta velocidad específica.

- **Williams (1995):** Otro autor temprano que investigo exhaustivamente las características de las bombas cuando operan en modo inverso, contribuyendo al conocimiento fundamental de las relaciones de rendimiento de las PATs.
- **Derakhshan & Nourbakhsh (2008):** Sus correlaciones son ampliamente citadas en la literatura. Han desarrollado ecuaciones empíricas robustas, basadas en un extenso conjunto de datos experimentales, para predecir H_T , Q_T , N_T , η_T a partir de los parámetros de la bomba. Sus ecuaciones a menudo se expresan en términos de cocientes de valores (por ejemplo: Q_T/Q_B).
- **Goyal & Kumar (2015):** Han llevado a cabo extensas revisiones de la literatura existente y han propuesto el desarrollo de nuevas correlaciones. Sus investigaciones a menudo incorporan técnicas de optimización y aprendizaje automático para mejorar la precisión de las predicciones de PAT.
- **Carravetta et al. (2018):** Este grupo de investigación italiano ha realizado un trabajo significativo en la caracterización detallada de PATs. Han contribuido con correlaciones empíricas y análisis profundos de la dinámica de fluidos, proporcionando una comprensión más completa del comportamiento de estas máquinas.

La mayoría de estas correlaciones se presentan en forma de ecuaciones empíricas o semi-empíricas. Por ejemplo, una correlación genérica podría tener la forma:

$$H_{T,BEP} = C_1 * H_{B,BEP} \quad (4.19)$$

$$Q_{T,BEP} = C_2 * Q_{B,BEP} \quad (4.20)$$

$$N_{T,BEP} = C_3 * N_{B,BEP} \quad (4.21)$$

$$\eta_{T,BEP} = C_4 * \eta_{B,BEP} \quad (4.22)$$



Donde C_1, C_2, C_3, C_4 son coeficientes que varían según la correlación específica y a menudo, dependen de la velocidad específica de la bomba (N_q).

Se analizarán y compararán dos escenarios principales basados en diferentes velocidades de operación objetivo para las turbinas (N_t). El objetivo final es proporcionar las especificaciones técnicas clave ($H_p, Q_p, N_p, \eta_{\max_p}$), que permitan buscar y seleccionar las bombas adecuadas en el mercado comercial.

4.11.1 Correlaciones empíricas

Los factores de conversión se definen como:

$$C_Q = \frac{Q_{BEP,t}}{Q_{BEP,b}}, \quad C_H = \frac{H_{BEP,t}}{H_{BEP,b}} \quad (4.23)$$

Tabla 15

Correlaciones para factores C_Q y C_H

Alatorre-Frenk & Thomas (1990)	$0.85\sqrt{\eta_b} + 0.385$	$2\eta_b^{0.95} + 0.205$
Barbarelli et al. (2016)	$0.00026N_s^2 - 0.02302N_s + 1.88171$	$-0.00003N_s^3 + 0.00331N_s^2 - 0.15047N_s + 3.68497$
Derakhshan & Nourbakhsh (2008)	Relaciones adimensionales ϕ, Ψ	
Childs (1962)	$1/\eta_b$	$1/\eta_b$
Yang et al. (2012)	$1.2\eta_b^{0.8}$	$1.2\eta_b^{1.2}$

Nota: Elaboración Propia

4.12 Datos de partida del proyecto

- Altura neta disponible (H_t): 100 m
- Caudal total del sitio (Q_{total}): 0.2 m³/s
- Caudal por turbina (Q_t): $Q_{total}/2 = 0.1 \text{ m}^3/\text{s} = 100 \text{ L/s}$
- Potencia eléctrica generada ($P_{elec,t}$) por grupo: 73.55 kW
- Eficiencia global objetivo (η_{global}): 0.75 (75%) por cada unidad PAT + Generador



- Densidad del agua (ρ): 1000 kg/m³
- Aceleración de la gravedad (g): 9.81 m/s²

4.13 Metodología de cálculo

La metodología se basa en los principios y correlaciones presentados en los manuales de referencia proporcionados (Manual on Pumps Used as Turbines MHPG y Pumps as Turbine: A user's guide). Los pasos principales son:

- a) **Verificación de consistencia:** Comprobar que la potencia eléctrica objetivo es alcanzable con la potencia hidráulica disponible y la eficiencia global.
- b) **Estimación de eficiencias:** Desglosar η_{global} en η_t (turbina) y η_{gen} (generador). Estimar $\eta_{max,p}$ (bomba BEP) basándose en η_t y ajustando según coherencia con la velocidad específica (N_{sp}) calculada y datos empíricos.
- c) **Cálculo parámetros bomba @ N_t :** Usar el método Sharma para hallar Q_p y H_p requeridos en el BEP de la bomba, a la velocidad $N_p = N_t$.

$$Q_p = Q_t * (\eta_{max,p})^{0.8} \quad (4.24)$$

$$H_p = H_t * (\eta_{max,p})^{1.2} \quad (4.25)$$

- d) **Cálculo velocidad específico (N_{sp}):** Calcular N_{sp} a $N_p = N_t$ y verificar consistencia de $\eta_{max,p}$.

$$N_{sp} = N_p * \frac{(Q_p)^{0.5}}{(H_p)^{0.75}} \quad (Unidades: N_p(rpm), Q_p \left(\frac{m^3}{s}\right), H_p(m)) \quad (4.26)$$

- e) **Escalonado a velocidad estándar ($N_{p,std}$):** Usar leyes de afinidad para escalar Q_p , H_p a una velocidad estándar de motor ($N_{p,std}$) para búsqueda en catálogos.

$$Q_{p,std} = Q_p * \frac{N_{p,std}}{N_t} \quad (4.27)$$

$$H_{p,std} = H_p * \left(\frac{N_{max,p}}{N_t}\right)^2 \quad (4.28)$$

- f) **Análisis comparativo:** Contrastar resultados e implicaciones.



4.14 Verificación de consistencia

Se verifica para una unidad PAT

- Potencia hidráulica disponible ($P_{hyd,t}$):

$$P_{hyd,t} = \rho * g * Q_t * H_t \quad (4.29)$$

$$= 1000 \text{kg/m}^3 * 9.81 \text{ m/s}^2 * 0.1 \text{m}^3/\text{s} * 100 \text{m} \approx 98100 \text{W} = 98.1 \text{kW}$$

- Potencia eléctrica disponible ($P_{elec,calc}$):

$$P_{elec,calc} = P_{hyd,t} * \eta_{global} \quad (4.30)$$

$$= 98.1 \text{ kW} * 0.75 = 73.575 \text{ kW}$$

Conclusión: La potencia calculada ($\approx 73.575 \text{ kW}$) coincide con el objetivo de 73.55 kW .

Los datos son consistentes.

4.15 Cálculos detallados por escenario

Se analizan dos escenarios según la velocidad objetivo N_t .

4.15.1 Escenario A: Velocidad objetivo turbina $N_t = 851.62 \text{ rpm}$

4.15.1.1 Eficiencias estimadas y ajuste

Se requiere $\eta_t * \eta_{gen} = 0.75$. La velocidad específica resultante ($N_{sp} \approx 9.7$, ver calculo abajo) sugiere que una eficiencia de bomba realista es $\eta_{max,p} \approx 77\%$. Asumiendo $\eta_t \approx \eta_{max,p} = 0.77$, la eficacia requerida del generador seria $\eta_{gen} = 0.75/0.77 \approx 0.974$ (97.4%). Advertencia: esta eficiencia del generador es extremadamente alta y probablemente inalcanzable. Mantener $\eta_{global} = 0.75$ en este escenario es muy desafiante. Se procederá usando $\eta_{max,p} = 0.77$ para definir la bomba requerida.

4.15.1.2 Parámetros bomba (BEP) @ 851.62 rpm (con $\eta_{max,p} = 0.77$)

Usando las ecuaciones de caudal y altura para la bomba

- $Q_p = 0.1 \text{m}^3/\text{s} * (0.77)^{0.8} = 0.0811 \text{m}^3/\text{s} (\approx 81.1 \text{ L/s})$
- $H_p = 100 \text{m} * (0.77)^{1.2} = 73.08 \text{ m}$



4.15.1.3 Cálculo N_{sp} @ 851.62 rpm

Usando la ecuación de velocidad específica

$$N_{sp} = 851.62 * \frac{(0.0811)^{0.5}}{(73.08)^{0.75}} = 9.7$$

Verificación: $N_{sp} = 9.7$ es coherente con la $\eta_{max,p} = 77\%$ asumida para este tipo de bomba (radial, baja N_{sp}).

4.15.1.4 Escalonado a velocidades estándar

Se escalan los parámetros ($Q_p = 0.0811 \text{ m}^3/\text{s}$, $H_p = 73.08 \text{ m}$ @ 851.62 rpm) a velocidades estándar de motores (ej. 60 Hz).

- Opción A1: $N_{p,std} = 900 \text{ rpm}$ (8 polos)
 - $Q_{p,std} = 0.0811 \text{ m}^3/\text{s} * (900 \text{ rpm}/851.62 \text{ rpm}) \approx 0.0857 \text{ m}^3/\text{s} (\approx 85.7 \text{ L/s})$
 - $H_{p,std} = 73.08 \text{ m} * (900 \text{ rpm}/851.62 \text{ rpm})^2 \approx 81.62 \text{ m}$
 - Especificación A1: Bomba BEP @ $Q \approx 85.7 \text{ L/s}$, $H \approx 81.62 \text{ m}$, $N = 900 \text{ rpm}$, $\eta_{max} \geq 77\%$.
- Opción A2: $N_{p,std} = 1200 \text{ rpm}$ (6 polos)
 - $Q_{p,std} = 0.0811 \text{ m}^3/\text{s} * (1200 \text{ rpm}/851.62 \text{ rpm}) \approx 0.1143 \text{ m}^3/\text{s} (\approx 114.3 \text{ L/s})$
 - $H_{p,std} = 73.08 \text{ m} * \left(\frac{1200 \text{ rpm}}{851.62 \text{ rpm}}\right)^2 \approx 145.1 \text{ m}$
 - Especificación A1: Bomba BEP @ $Q \approx 114.3 \text{ L/s}$, $H \approx 145.1 \text{ m}$, $N = 1200 \text{ rpm}$, $\eta_{max} \geq 77\%$.

4.15.1.5 Implicaciones prácticas de $N_t = 851.62 \text{ rpm}$

La velocidad de operación de la turbina no es estándar para conexión directa a red de 60 Hz. Requiere transmisión mecánica (correas/engranajes, con pérdidas 2-5%) o convertidor



de frecuencia (inversor, con pérdidas 3-5% y mayor costo/complejidad). Dado que la bomba seleccionada operando como turbina presenta una eficiencia máxima estimada de $\eta_t \approx 77\%$ para $N_{sp} \approx 9.7$, y considerando además las pérdidas adicionales del generador y la transmisión, lograr una eficiencia global $\eta_{global} \approx 0.75$ es muy difícil en este escenario. Esto limita el alcance de la potencia eléctrica neta requerida (≈ 73.55 kW).

4.15.2 Escenario B: Velocidad objetivo turbina $N_t = 1550$ rpm

4.15.2.1 Eficiencias estimadas y ajuste

Se requiere $\eta_t * \eta_{gen} = 0.75$. La velocidad específica resultante ($N_{sp} \approx 17.3$, ver cálculo abajo) sugiere que una eficiencia de bomba realista es $\eta_{max,p} \approx 80\%$. Asumiendo $\eta_t \approx \eta_{max,p} = 0.80$, la eficacia requerida del generador sería $\eta_{gen} = 0.75/0.80 \approx 0.937$ (93.7%). Nota: esta eficiencia del generador es alta pero plausible.

4.15.2.2 Parámetros bomba (BEP) @ 1550 rpm (con $\eta_{max,p} = 0.80$)

Usando las ecuaciones de caudal y altura para la bomba

- $Q_p = 0.1m^3/s * (0.80)^{0.8} = 0.0836m^3/s (\approx 83.6 L/s)$
- $H_p = 100m * (0.80)^{1.2} = 76.51 m$

4.15.2.3 Cálculo N_{sp} @ 1550 rpm

Usando la ecuación de velocidad específica

$$N_{sp} = 1550 * \frac{(0.0836)^{0.5}}{(76.51)^{0.75}} = 17.3$$

Verificación: $N_{sp} = 17.3$ (radial, media-baja N_{sp}) es consistente con la posibilidad de alcanzar $\eta_{max,p} = 80\%$ con una bomba de alta calidad y buen diseño hidráulico.

4.15.2.4 Escalonado a velocidades estándar

Usando: $N_{p,std} = 1800$ rpm (4 polos, 60 Hz)

- $Q_{p,std} = 0.0836m^3/s * (1800rpm/1550rpm) \approx 0.0971m^3/s (\approx 97.1L/s)$
- $H_{p,std} = 73.08m * (1800rpm/1550rpm)^2 \approx 98.6m$



- Especificación B: Bomba BEP @ $Q \approx 97.1 \text{ L/s}$, $H \approx 98.6 \text{ m}$, $N = 1800 \text{ rpm}$, $\eta_{\max} \geq 80\%$.

4.15.2.5 Implicaciones prácticas de $N_t = 1550 \text{ rpm}$

La velocidad objetivo de la turbina ($\approx 1550\text{--}1700 \text{ rpm}$) se encuentra dentro del rango que permite el acoplamiento directo con un generador de inducción estándar de 4 polos (60 Hz), cuya velocidad síncrona es 1800 rpm. Esto hace posible la conexión directa sin multiplicación mecánica, lo cual simplifica la instalación, reduce costos y elimina pérdidas mecánicas típicas (2–5%).

4.16 Análisis comparativo y tipos de bombas

4.16.1 Comparación de especificaciones requeridas

En la siguiente tabla se resume las especificaciones de bomba resultantes para cada escenario:

Tabla 16

Resumen de especificaciones de bomba (Modo bomba, BEP) por unidad

Parámetro	Escenario A1 (900rpm)	Escenario A2 (1200rpm)	Escenario B (1800rpm)
$N_{p,\text{std}}$ (rpm)	900	1200	1800
$Q_{p,\text{std}}$ (L/s)	≈ 85.7	≈ 114.3	≈ 97.1
$H_{p,\text{std}}$ (m)	≈ 81.62	≈ 145.1	≈ 98.6
$\eta_{\max}$ min. Req. (%)	≥ 77	≥ 77	≥ 80
N_{sp} calculado	≈ 9.7	≈ 9.7	≈ 17.3
N_t operación turbina (rpm)	851.62	851.62	≈ 1550
Conexión generadora	Indirecta	Indirecta	Directa

Nota: Elaboración Propia



4.16.2 Tipos de bomba asociadas

- **Escenario A ($N_{sp} \approx 9.7$):** Corresponde a bombas centrifugas radiales (radial-flow), con flujo radial puro. Estas suelen tener rodete de palas muy curvadas, el diámetro de rodete grande respecto al ancho, la carcasa partida y tiene excelente rendimiento a altas alturas, pero bajo caudal. Una bomba recomendada sería una ISO 2858 pero en modelos más pequeños.
- **Escenario B ($N_{sp} \approx 17.3$):** Corresponde a bombas centrifugas radiales, con flujo radial predominante con tendencia mixta (mixed-flow). Estas suelen tener mayor ancho de rodete lo cual le da mejor manejo del caudal, se suelen usar en instalaciones con caudales medianos y alturas medias. Una bomba recomendada sería una ISO 2858 de tamaño medio (como la 125-400).

4.17 Método J. M Chapallaz, P, Eichenberger, G. Fisher

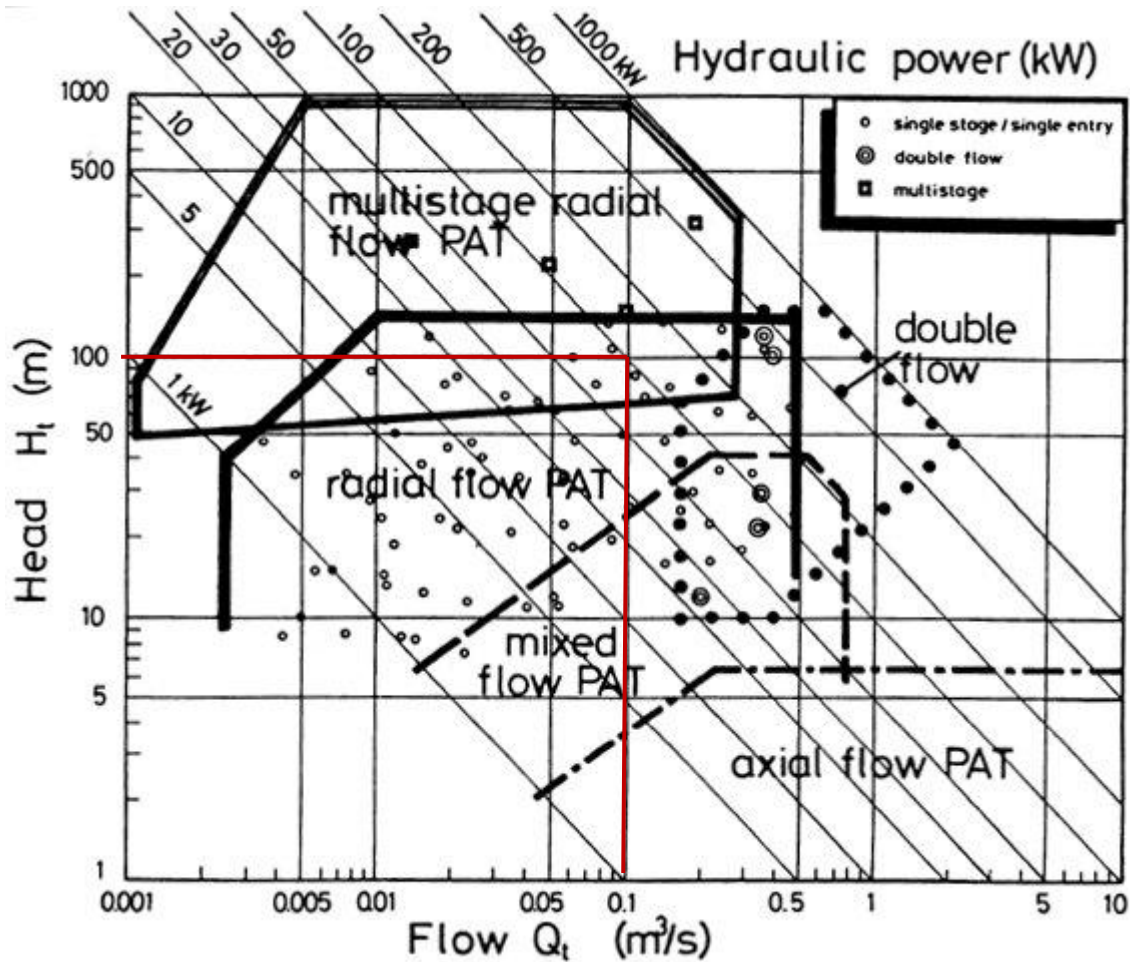
4.17.1 Diseño de altura y caudal

- Altura neta disponible (H_t): 100 m
- Caudal total del sitio (Q_{total}): $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$
- Caudal por turbina (Q_t): $Q_{total}/2 = 0.1 \text{ m}^3/\text{s} = 100 \text{ L/s}$
- Potencia hidráulica (P): $\rho * g * Q_t * H_t = 1000 * 9.81 * 0.1 * 100 = 98.1 \text{ kW}$

El siguiente diagrama indica que tipo de PAT probablemente se ajustaría a la aplicación.

Figura 50

Rango general de aplicación de diferentes PAT.



Nota: Fuente: Chapallaz et al. (1992)

4.17.2 Velocidad específica en modo turbina

Asumamos una velocidad nominal de la PAT $n_t = 1790$

En este caso 1790rpm es un buen compromiso entre el tamaño de la PAT y su tolerancia para la velocidad de embalamiento; si un motor de inducción actuando como generador va a ser accionado, se debe agregar el deslizamiento.

Cálculo de la velocidad específica de la instalación (modo turbina):

$$\eta_{qti} = \eta_t * \frac{\sqrt{Q_{ti}}}{H_{ti}^{\frac{3}{4}}} \quad (\text{unidades: } \eta_t(\text{rpm}), Q_{ti}(\text{m}^3/\text{s}), H_{ti}(\text{m})) \quad (4.31)$$

Sustituyendo valores:

$$\eta_{qti} = 1790 * \frac{\sqrt{\frac{0.1m^3}{s}}}{100^{\frac{3}{4}}} = 17.9$$

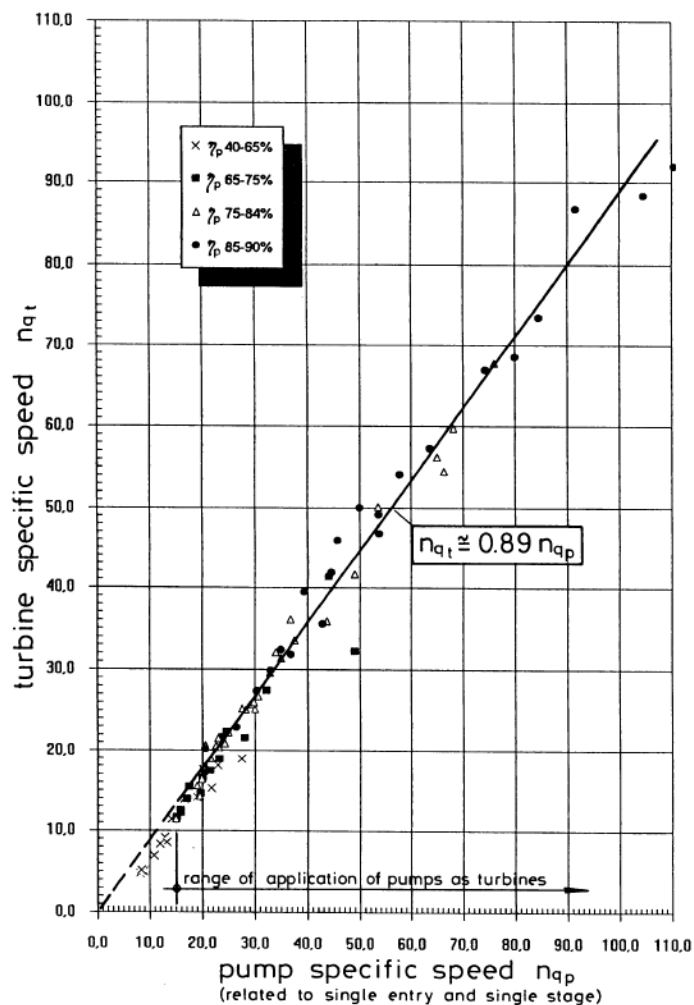
Para PATs de múltiples etapas y doble flujo, se debe relacionar la altura y el flujo a un impulsor de una sola etapa y una sola entrada: i_{st} = número de etapas; i_n = número de entradas. En nuestro caso asumiremos que el número de etapas y el número de entradas son 1.

4.17.3 Velocidad específica en modo bomba

Usamos la siguiente fórmula para saber la velocidad específica en modo bomba.

Figura 51

Relación entre N_q en modo bomba y N_q en modo turbina.



Nota: Fuente: Chapallaz et al. (1992)



Además, se utiliza para verificar que $\eta_{qp} > 15$, de lo contrario, será necesario cambiar la velocidad PAT asumida, al igual que le número de etapas y entradas del impulsor.

$$\eta_{qp} = \frac{\eta_{qt}}{0.89} = \frac{17.9}{0.89} \approx 20.11 \quad (4.32)$$

Al obtener de resultado $\eta_{qp} \approx 17.4$ queda claro que los valores que asumimos son aceptables.

4.17.4 Eficiencia de la bomba

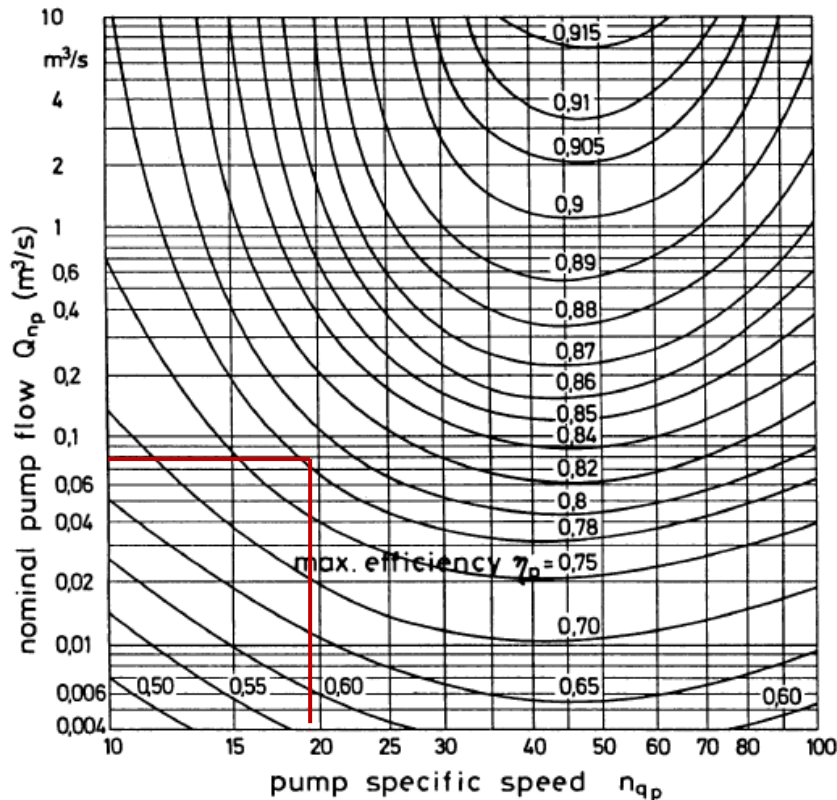
Considerando que:

$$Q_{np} \approx Q_{nt}/1.3 = 0.1/1.3 = 0.076 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4.33)$$

Utilizaremos la siguiente tabla para estimar la eficiencia máxima de las bombas adecuadas.

Figura 52

Máxima eficiencia de la bomba.



Nota: Fuente: Chapallaz et al. (1992)

La máxima eficiencia de la bomba $\eta_p \approx 0.78$

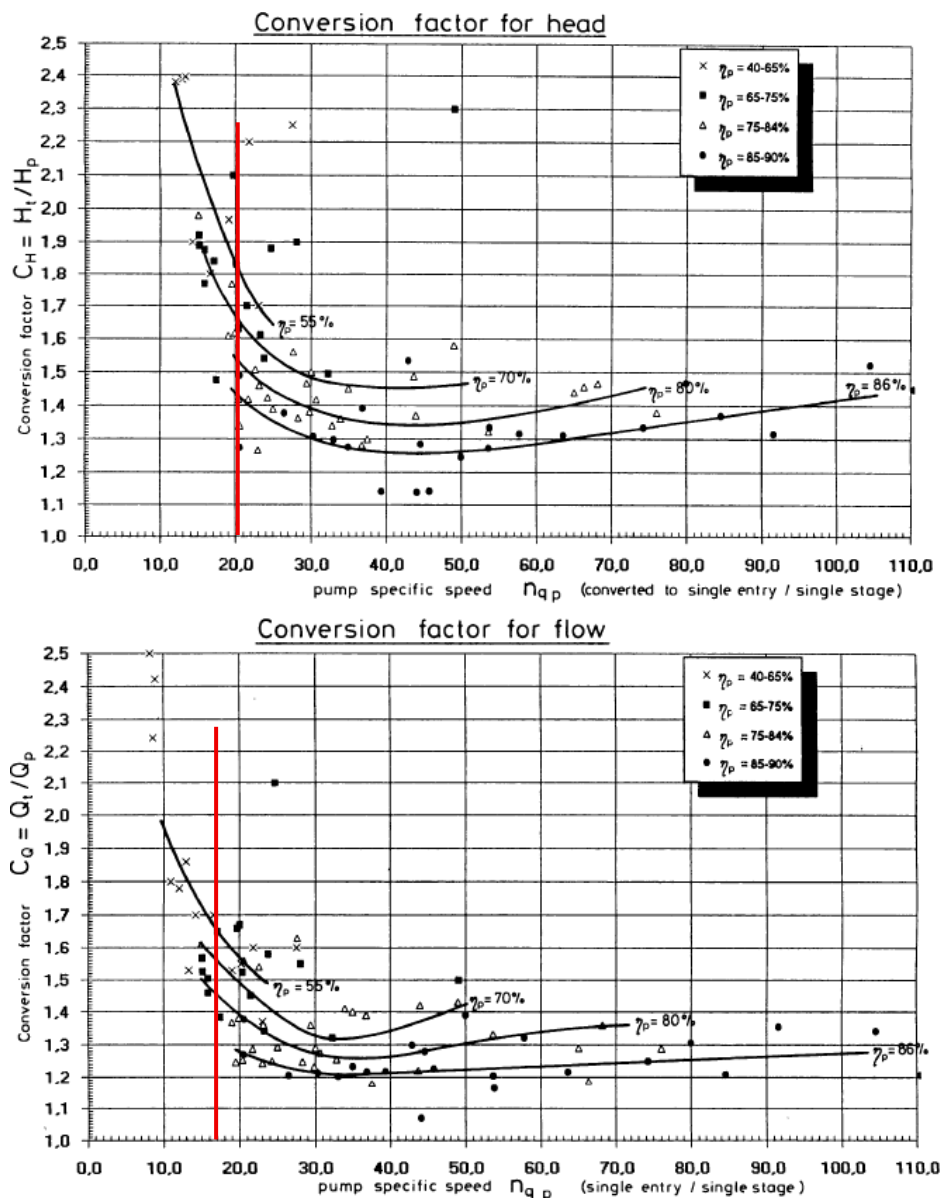
4.17.5 Conversión de las condiciones de diseño de turbina en condiciones de diseño de bomba

Con los valores obtenidos de velocidad específica y eficiencia de la bomba, obtendremos los factores de conversión para altura C_H y caudal C_Q .

$$\eta_{qp} = 20.11; \eta_p \approx 0.78$$

Figura 53

Eficiencia máxima vs velocidad específica modo bomba.



Nota: Fuente: Chapallaz et al. (1992)



Los valores aproximados serán:

$$C_H \approx 1.48; C_Q \approx 1.36$$

La altura y caudal en condición de turbina a la velocidad η_t , considerando: $H_{nt} = 100$ m; $Q_{nt} = 0.1$ m³/s. Para obtener las condiciones equivalentes de bomba a la misma velocidad η_t .

$$H_{np}(nt) = \frac{H_{nt}}{C_H} = \frac{100}{1.48} = 67.5m \quad (4.34)$$

$$Q_{np}(nt) = \frac{Q_{nt}}{C_Q} = \frac{0.1}{1.36} = 0.07m^3/s \quad (4.35)$$

4.17.6 Conversión de las condiciones de diseño de bomba a velocidad nominal de turbina a velocidad nominal de bomba

Las bombas centrifugas estándar suelen ser accionados por motores de inducción. Por lo tanto, los fabricantes informan que el rendimiento de la bomba debe ser inferiores a las velocidades síncronas. Asumimos: $\eta_p = 1790$

Altura nominal de la bomba a velocidad de bomba η_p :

$$H_{np}(np) = H_{np}(nt) * \left(\frac{n_p}{n_t}\right)^2 = 66.2 * \left(\frac{1790}{1550}\right) = 74.48m \quad (4.36)$$

$$Q_{np}(np) = Q_{np}(nt) * \frac{n_p}{n_t} = 0.07 * \left(\frac{1790}{1550}\right) = 0.08m^3/s \quad (4.37)$$

4.18 Análisis para la selección de la turbina

La selección de una turbina hidráulica parte del análisis de las velocidades específicas N_s en función de la potencia y N_q en función del caudal, partiendo con los parámetros de diseño definidos para la instalación. Los valores de N_s y N_q hallados nos permiten entrar en gráficos H-Q y en tablas en la cuales podemos ubicar y seleccionar la turbina más adecuada, decisión que debe asumir el ingeniero de diseño de la instalación hidroeléctrica.

El procedimiento por seguir para la selección más adecuada deberá ser el siguiente:

- Se parte con los datos de entrada altura (H) y caudal (Q)
- Se estima la potencia al eje (P_e) suponiendo un rendimiento “normal”



- Conocidos H, Q, Pe y Ns o Nq se determina el régimen de giro de la turbina
- El valor final de N habrá de ser una velocidad síncrona.
- Con dicho valor de N se recalcula el valor de Ns
- Con estos datos se puede seleccionar la turbina adecuada que decida el diseñador.

Los datos de entrada para seguir el procedimiento indicado y sus resultados los mostramos en el siguiente cuadro para 01 grupo hidroeléctrico:

Tabla 17

Datos de entrada de la M.C.H. Urpay

DATOS DE ENTRADA		UNIDADES
N	1790	RPM
Pe	73.55	kW
	98.59	HP
	98.63	CV
H	100	M
Q	0.1	m ³ /seg
nt	0.75	
ng	0.95	
ntras	1	
P _{EE}	69.87	kW

Nota: Elaboración propia

De los valores de entrada mostrados en la tabla 17, determinamos el Ns y Nq de la instalación para una velocidad de 1750 RPM (Velocidad de 1800 RPM con resbalamiento):

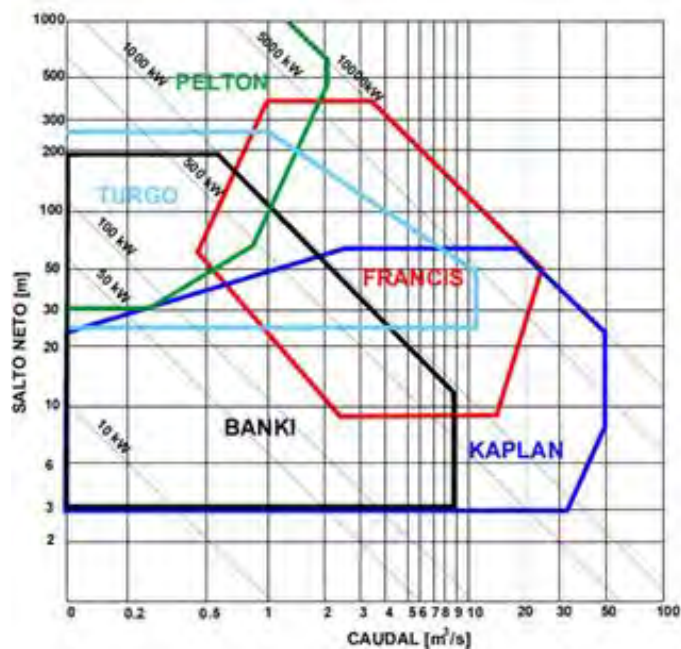
$$N_s = N \frac{\sqrt{P_e}}{H^{1.25}} \quad (4.38)$$

$$N_q = N \frac{\sqrt{Q}}{H^{0.75}} \quad (4.39)$$

Donde obtenemos los siguientes valores; Ns = 56.21 y Nq = 17.90

Figura 54

Selección de turbina respecto al caudal y la altura



Nota: Fuente: Catacora Acevedo (n.d.)

Figura 55

Características principales de turbinas hidráulicas

TURBINA		Inventor y año de patente	N_s (rpm, HP, m) rpm	Q m³/s	H m	P kW	$\eta_{m\acute{a}x}$ %
A C C I Ó N R	PELTON	Lester Pelton (EE.UU.) 1880	1 Ch: 30	0.05-50	30-1800	2-300000	91
			2 Ch: 30-50				
			4 Ch: 30-50				
			6 Ch: 50-70				
	TURGO	Eric Crewdson (G. Bretaña) 1920	60-260	0.025-10	15-300	5-8000	85
	MICHELL-BANKI	A.G. Michell (Australia) 1903 D. Banki (Hung.) 1917-1919	40-160	0.025-5	1-50 (200)	1-750	82
	Bomba rotodinámica	Dionisio Papin (Francia) 1689	30-170	0.05-0.25	10-250	5-500	80

Nota: Fuente: Coz et al. (1995)



Discusión: De acuerdo a los valores hallados, para la altura H y caudal Q de diseño podemos determinar las siguientes alternativas:

- Se puede seleccionar una turbina Pelton de 4 toberas.
- Se puede seleccionar una turbina Turgo.
- Se puede seleccionar una turbina Michell Banki.
- Se puede seleccionar una bomba rotodinámica.

Puesto que el planteamiento principal del presente trabajo de investigación es utilizar una configuración de un grupo hidroeléctrico no convencional que utilice bombas hidráulicas operando como turbinas (PAT), decidimos optar por la selección de una bomba comercial que operando en forma inversa como turbina sea capaz de generar potencia mecánica al eje (P_e) para accionar un motor asíncrono que se comporte como generador asíncrono y pueda generar energía eléctrica en sus bornes (P_{EE}) asistido por un tablero de control electrónico que permitirá entregar un voltaje y frecuencia dentro de los parámetros comerciales y de menor costo que un grupo hidroeléctrico convencional.

4.18.1 Elección de bomba como turbina (PAT) comercial

Se procede a elegir una bomba que se acerque a los valores resultantes después de aplicar semejanza y afinidad para una velocidad de giro comercial.

Lo más ideal o habitual para las instalaciones industriales/agua es buscar una centrifuga ISO/ANSI que cubra la altura, para este caso puede ser una bomba centrifuga radial de etapa única, multietapa radial, o una bomba de flujo mixto de baja N_s .

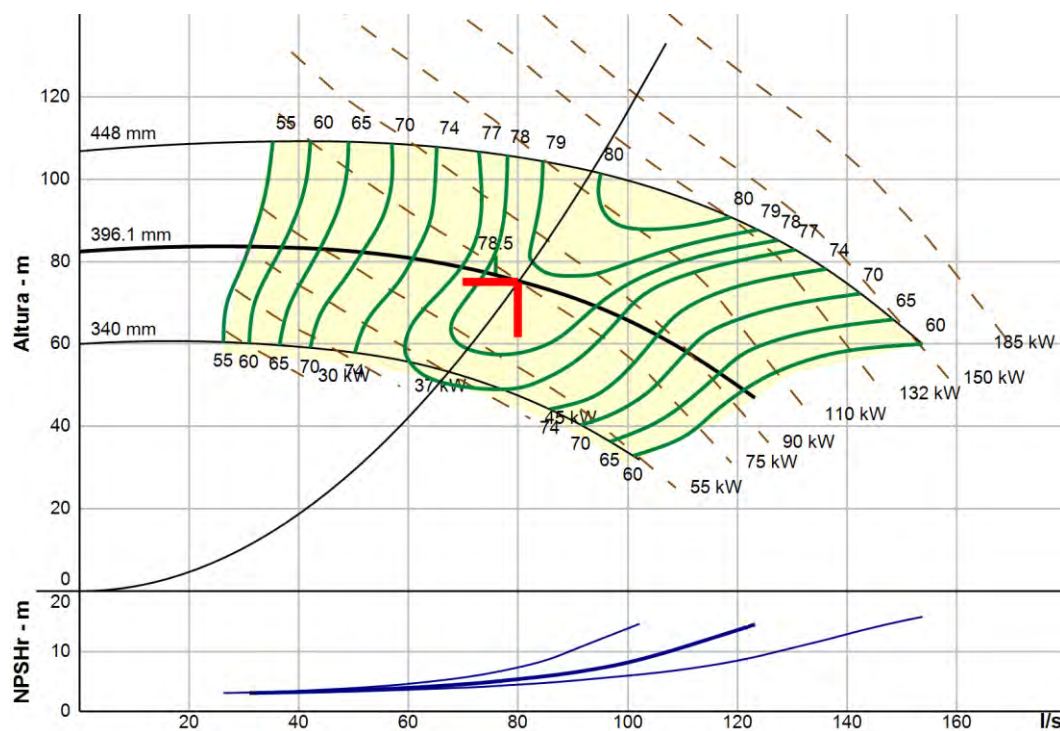
De acuerdo a los datos de partida del proyecto ($H_t = 100$ m, $Q_t = 0.1$ m³/s por unidad, $P_{elec} \approx 73.55$ kW) y aplicando los distintos métodos de predicción y conversión de rendimiento en modo turbina (Sharma, Derakhshan & Nourbakhsh, Childs, correlaciones CQ–CH, métodos de similitud, así como la metodología del Manual on Pumps Used as Turbines y de Chapallaz), se determinó:

La bomba más adecuada para operar como turbina (PAT) en la M.C.H. Urpay es una bomba centrífuga radial ISO 2858 modelo 125-400, operando a una velocidad cercana a 1550–1800 rpm.

La Norma ISO 2858 es un estándar internacional para la fabricación de bombas centrífugas de aspiración axial, especificando sus dimensiones, tipos y puntos de funcionamiento nominal para sistemas de hasta presión nominal de 16 bar, centrada en intercambiabilidad de componentes y fácil mantenimiento (extracción hacia atrás)

Figura 56

Curvas mostradas para bomba 125-400.



Nota: Fuente: Hidrostral (2015)



5. CAPÍTULO V: GRUPO HIDROELÉCTRICO Y ESPECIFICACIONES

TECNICAS.

5.1. Introducción.

En la presente unidad, se va desarrollar una descripción de cada uno de los componentes del Grupo Hidroeléctrico propuesto, sus características técnicas, dimensionamiento y las normas generales que deben cumplir para ser instalados a futuro en la planta de generación de energía.

También se desarrolla las especificaciones técnicas que establecen los requisitos y características esenciales que deberán cumplir los equipos principales de generación como son la turbina PAT y generador asíncrono, equipos de control, materiales, accesorios destinados a la nueva instalación de la Mini Central Hidroeléctrica de Urpay, abarcando los componentes electromecánicos del proyecto.

5.1.1 Normas

Las especificaciones técnicas establecen, de manera explícita o implícita, las normas generales que deben cumplir los materiales, equipos y accesorios en cuanto a su fabricación.

Asimismo, además de las disposiciones del Reglamento Nacional de Construcciones, se podrán aceptar normas internacionales o diseños equivalentes, siempre que no impliquen una disminución en la calidad, seguridad o durabilidad de los materiales y equipos, debiendo en todo caso ajustarse a las normas indicadas, tales como:

ANSI	Instituto Americano de Normas
ASME	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos
ASTM	Sociedad Americana de Pruebas y Materiales
DIN	Instituto Alemán de Normas
SI	Sistema Internacional de Unidades
AISC	Instituto de la Construcción en Acero



ISO Organización Internacional de Normalización

5.1.2 Unidades de medida

Todas las dimensiones y medidas incluidas en la documentación técnica del equipo se presentarán en unidades del Sistema Internacional (SI).

5.1.3 Documentación técnica

El fabricante o proveedor deberá entregar catálogos, folletos descriptivos, esquemas, datos de peso y dimensiones generales, así como instrucciones de operación y mantenimiento, junto con toda la información necesaria para la correcta identificación y uso del material o equipo suministrado.

5.2 Grupo Hidroeléctrico.

La utilización de bombas como turbinas pueden remplazar a las turbinas hidráulicas convencionales como las Pelton, de hélice, Francis y Michel Banki en la generación de electricidad en pequeñas centrales hidroeléctricas. Esto se debe a su buen funcionamiento como turbinas y a su bajo costo en comparación con las turbinas convencionales para la misma potencia.

Las bombas como turbinas PATs operando con el flujo inverso y la consiguiente inversión del sentido de giro pueden mantener prácticamente la misma eficiencia, operando con mayor altura y caudal que la bomba original. Trabajos como el de Carvalho Viana & Horta Nogueira (2002), Chapallaz et al. (1992) y otros presentan procedimientos de selección para que la bomba opere como turbina, con base en resultados experimentales del caudal y la altura neta disponibles en una minicentral hidroeléctrica.

Por otro lado, es factible sustituir el generador síncrono por un motor de inducción que funciona como generador asíncrono. El uso de la máquina de inducción para la generación de energía eléctrica se conoce desde hace muchos años. El generador de inducción es capaz de suministrar potencia activa a una carga, sin embargo, no tiene la capacidad de generar potencia



reactiva para sí mismo ni para equipos auxiliares. Si el generador está conectado a la red, la potencia reactiva puede ser suministrada por la compañía eléctrica, pero cuando funciona de forma independiente es necesario utilizar una batería de condensadores, tanto para el generador como para la carga conectada a sus bornes, si ésta es de naturaleza reactiva.

Los componentes del grupo hidroeléctrico que se describirán en este capítulo serán los siguientes:

- Bomba como turbina PAT
- Válvula
- Generador asíncrono y sistema de transmisión.
- Tablero de control y medida.
- Sistema de regulación de carga.

5.3 Bomba como turbina PAT

En muchos países se ha experimentado y utilizado bombas de flujo hidráulico como turbinas, las bombas centrífugas multietapa, mono etapa, mixtas y axiales, pueden reemplazar a las turbinas convencionales como las Pelton, de hélice y Francis en la generación de electricidad en pequeñas centrales hidroeléctricas (rangos bajos de potencia de hasta 300 kW). Esto se debe a su buen desempeño como turbinas y a su bajo costo fijo y costos de operación comparado con las turbinas convencionales de la misma potencia. Al operar en sentido inverso del flujo y la consiguiente inversión del sentido de giro, la bomba que funciona como turbina (PAT), logrando una buena, potencia con mayor altura y caudal que la bomba original.

Los parámetros de operación de la PAT ya fueron calculados en el Capítulo IV donde se definieron las variables fundamentales de entrada y salida como son el caudal Q , altura de trabajo H , la potencia al eje P_e y fueron los siguientes:



Tabla 18

Parámetros de la mini central hidroeléctrica de Urpay

PARÁMETROS DE LA MINI CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE URPAY		
Caudal de diseño	0.2	m ³ /seg
Altura bruta	107.81	m
Altura neta	100	m
Potencia	100	kW

Nota: Elaboración Propia

La bomba centrífuga seleccionada, es una bomba centrífuga ISO 2858 de marca *Hidrostal*, esta bomba es fabricada según los estándares de la ISO. Esto garantiza intercambiabilidad de piezas, facilidad de reparación y mantenimiento y una sustitución perfecta con las bombas de otros fabricantes sin necesidad de cambios en la instalación. Un mínimo de componentes, y una construcción simple y robusta garantizan un servicio eficiente y libre de mantenimiento.

El impulsor o rodete, es del tipo centrífugo cerrado. Fabricado en fierro fundido gris o nodular, alternativamente se suministra en bronce y en acero inoxidable dependiendo del uso industrial al que será sometido. Está diseñado para una máxima eficiencia de bombeo. Balanceado electrónicamente para evitar vibraciones. Un aspecto fundamental en que es de fabricación nacional de un proveedor de amplia experiencia en el rubro que garantiza un suministro y stock de repuestos de todos sus accesorios interiores.

Por razones prácticas se propone la instalación de 02 bombas como turbinas, quiere decir que las condiciones operativas por cada turbina serán las siguientes:

- Altura neta H de 100 metros.
- Caudal de operación 0.1 m³/seg o 100 lt/seg.



Figura 57

Bomba centrífuga ISO 2858.



Nota: Fuente: Hidrostral (2015)

5.3.1 Especificaciones técnicas de la bomba.

Las bombas serán con caja en fierro fundido gris o nodular con recubrimiento cerámico. Estas trabajan en condiciones normales de operación (agua limpia a 20°C) de acuerdo a NORMA ISO 9906:2012 GRADO 2B.

A continuación, se detalla los **elementos** principales de la turbina PAT:

Tabla 19

Elementos principales de una PAT.

N. °	Elemento	Función principal
1	Rodete o impulsor	Convierte energía hidráulica en mecánica
2	Carcasa o voluta	Dirige y contiene el flujo
3	Eje	Transmite la rotación al generador
4	Cojinetes	Soporte y movimiento suave del eje
5	Sellos	Evitan fugas de agua
6	Difusor / descarga	Recupera energía cinética del agua
7	Acoplamiento	Une PAT con generador
8	Instrumentos	Miden presión, caudal, velocidad
9	Sistema de lubricación	Reduce fricción y desgaste
10	Base o bastidor	Soporte estructural

Nota: Elaboración Propia



Tabla 20

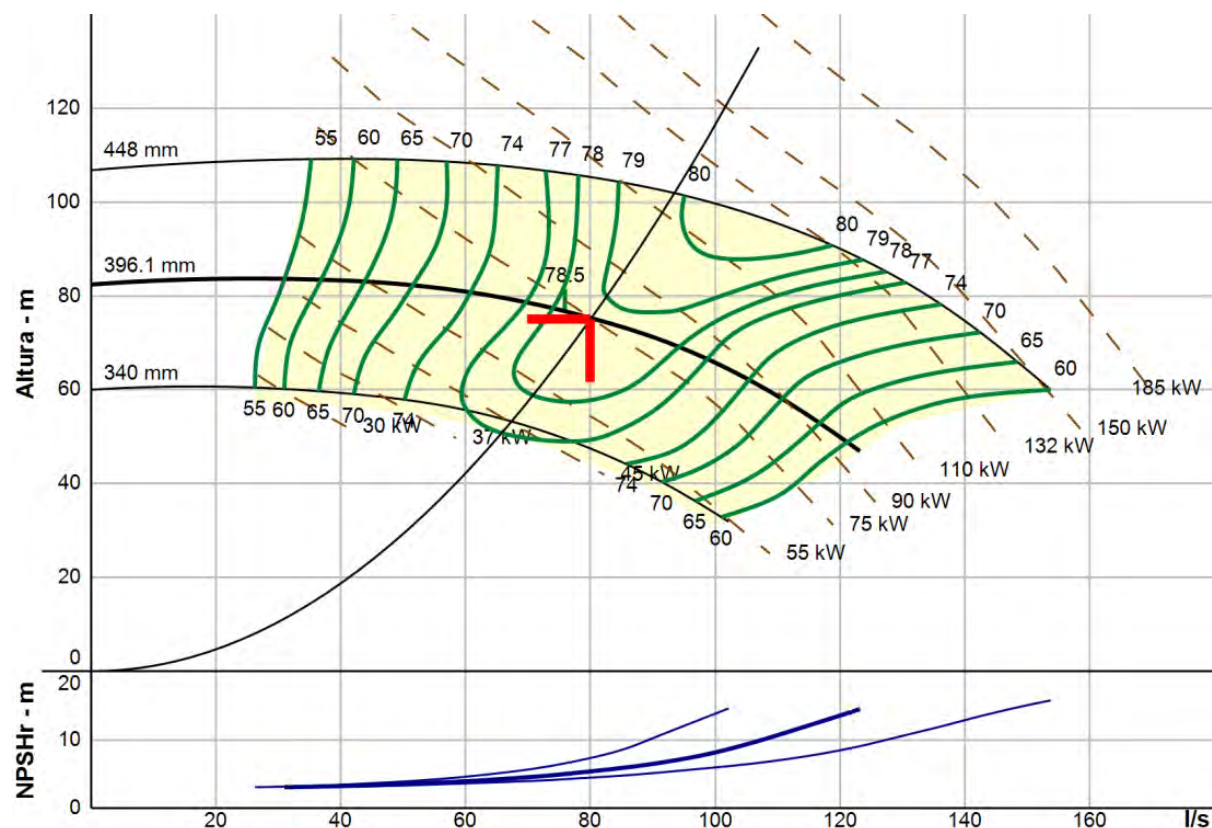
Características de la PAT

BOMBA	
Modelo:	125-400
Diámetro de rueda (impulsor):	400 / 425 / 448 mm
Alabes del rodete:	7 alabes
Velocidad de rotación:	1790 rpm
Potencia nominal:	Hasta ~90 HP
Caudal de descarga:	0.1 m ³ /seg
Eficiencia mecánica:	≈ 83 % máx
Tipo de conexión:	Bridas DIN – ND1: 315 mm / ND2: 450 mm

Nota: Elaboración Propia

Figura 58

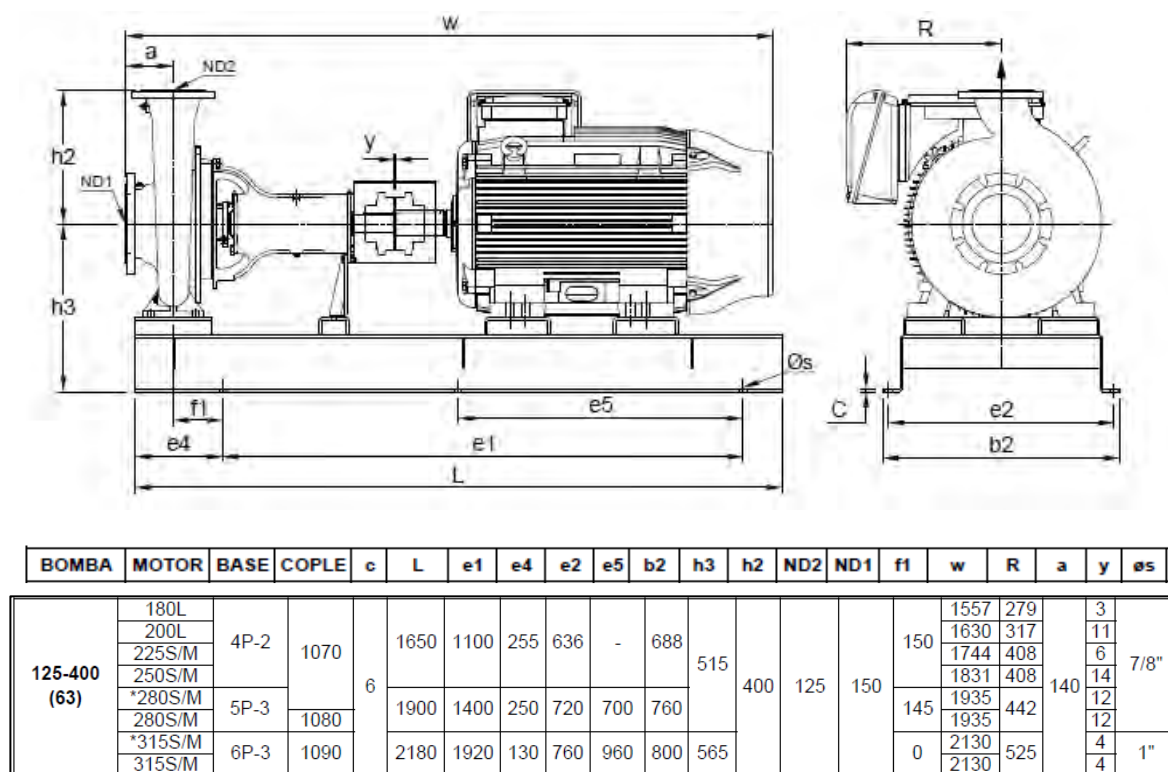
Curvas mostradas para bomba 125-400.



Nota: Fuente: Hidrostral (2015)

Figura 59

Medidas de la bomba



Nota: Fuente: Hidrostral (2015)

5.4 Motor asíncrono como generador.

En el presente trabajo de investigación desarrollado se propone sustituir el generador síncrono por un motor de inducción que funciona como generador. El uso de la máquina de inducción en la generación de energía eléctrica se conoce desde hace muchos años, el generador de inducción es capaz de suministrar potencia activa a una carga, sin embargo, no tiene la capacidad de generar potencia reactiva para sí mismo, ni para equipos como motores y transformadores.

Si el planteamiento fuera proyectar una M.C.H conectado a una red, la energía reactiva puede ser suministrada por la concesionaria de energía (ELSE), pero cuando funciona de forma aislada (generación distribuida), es necesario utilizar un banco de condensadores, tanto para el generador como para la carga que está conectada a sus terminales, si es de naturaleza reactiva.



La gran ventaja de utilizar un motor de inducción como generador, como la PAT, es su menor costo en comparación con el generador síncrono. También tiene la ventaja de la amplia disponibilidad en el mercado de máquinas eléctricas y prácticamente no requiere mantenimiento, debido a su mayor robustez y a la ausencia de escobillas. Sin embargo, su principal desventaja es el factor de potencia menor en comparación con el funcionamiento como motor.

En nuestro caso el generador asíncrono sería utilizado en un sistema aislado, la selección del generador de inducción se realizó mediante el método propuesto por (CHAPALLAZ et al., 1990), basado en curvas obtenidas experimentalmente. Conociendo la potencia en el eje del motor primario, en este caso una PAT, es posible seleccionar un motor de inducción que funcione como generador, el mismo que contara con un banco de condensadores para autoexcitación.

5.4.1 Potencia eléctrica en bornes del generador

La potencia eléctrica en bornes del generador es aquella que entrega el generador del grupo hidroeléctrico al tablero de control disponible a ser entregado al sistema que requiere la potencia eléctrica necesaria para operar por ejemplo la planta agroindustrial.

$$P_{EE} = 9.806QH\eta_t\eta_{tras}\eta_g \quad (5.1)$$

Donde:

P_{EE} = Potencia eléctrica entregada en bornes del generador en kW.

Q = Caudal de diseño en m³/seg.

H = Altura neta de la instalación en metros m.

η_{tras} = Eficiencias del sistema de transmisión de potencia directa con coples flexibles 1

η_g = Eficiencia del generador síncrono (0.9 a 0.95).



De acuerdo a los cálculos debemos seleccionar un motor de inducción trifásico que funcione como como generador asíncrono mínimo de 70 kW, la cual se vio reflejada en la tabla 17.

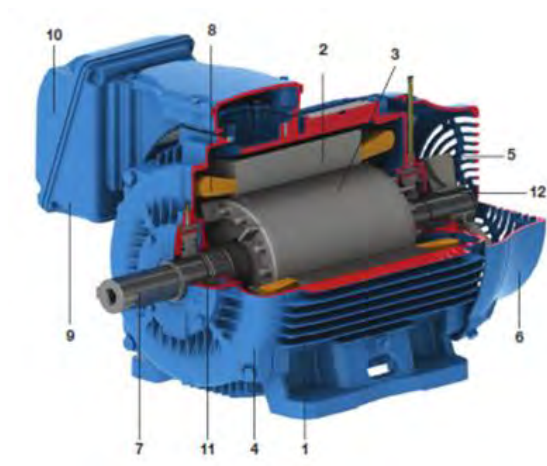
5.4.2 Especificaciones técnicas

El motor eléctrico es la máquina destinada a transformar energía eléctrica en energía mecánica. El motor de inducción que se selecciona en este punto y que trabajara como generador de inducción asíncrono, es el más usado de todos los tipos de motores, ya que combina las ventajas de la utilización de energía eléctrica bajo costo, facilidad de transporte, limpieza, simplicidad de comando - con su construcción simple y su gran versatilidad de adaptación a las cargas de los más diversos tipos y mejores rendimientos. Se seleccionará un motor de inducción que funciona normalmente con una velocidad constante, que varía ligeramente con la carga mecánica aplicada al eje. Debido a su gran simplicidad, robustez y bajo costo, es el motor más utilizado de todos, siendo adecuado para casi todos los tipos de máquinas accionadas, encontradas en la práctica.

Los motores de la línea WEG W22 han sido desarrollados con altos estándares de eficiencia y consumo de energía, bajo nivel de ruido y vibración, con sistemas de ventilación que reducen la temperatura de la carcasa e incrementa la vida útil del motor.

Figura 60

Motor eléctrico de inducción como Generador Principal asíncrono de 75 kW.



Nota: Extraído del catálogo WEG (<https://weg.net/institutional/US/es/>)

Motor de Inducción Trifásico

El motor de inducción trifásico (Figura 46) está compuesto fundamentalmente por dos partes: estator y rotor:

Estator

1. Carcasa: es la estructura soporte del conjunto de construcción robusta en hierro fundido, acero o Aluminio inyectado, resistente a corrosión y normalmente con aletas.
2. Núcleo de chapas: las chapas son de acero magnético.
3. Devanado trifásico: tres conjuntos iguales de bobinas, una para cada fase, formando un sistema trifásico equilibrado ligado a red trifásica de alimentación.

Rotor

4. Eje transmite la potencia mecánica desarrollada por el motor.
5. Núcleo de chapas, las chapas poseen las mismas características de las chapas del estator.
6. Barras y anillos de cortocircuito son de aluminio inyectado sobre presión en una única carcasa.
7. Tapa
8. Ventilador



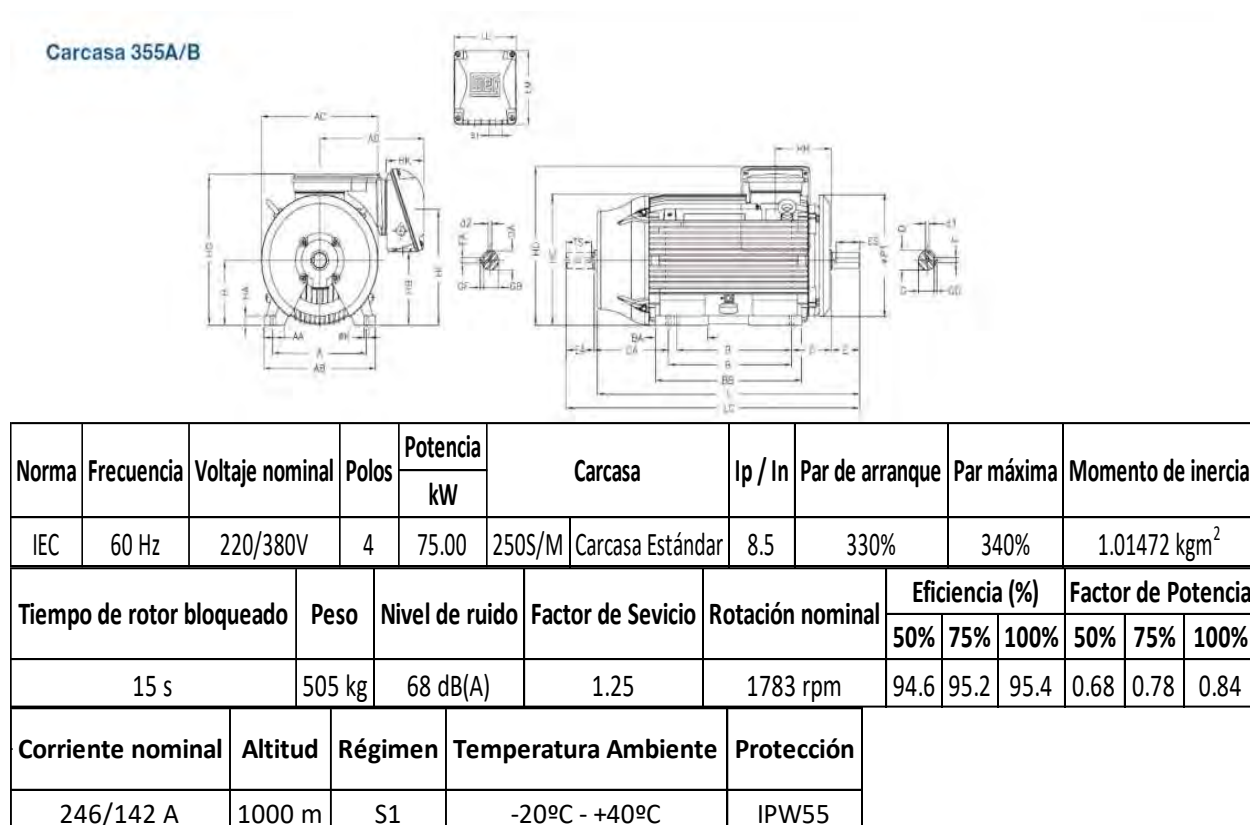
9. Tapa deflectora
10. Caja de conexión
11. Terminales
12. Rodamientos

El generador asíncrono es una maquina eléctrica tipo Jaula de Ardilla en el mismo son inducidas electromagnéticamente por el estator, de ahí su nombre de motor de inducción.

Motor trifásico WEG-W22 Carcasa de Hierro Gris - Premium Efficiency - IE3

Figura 61

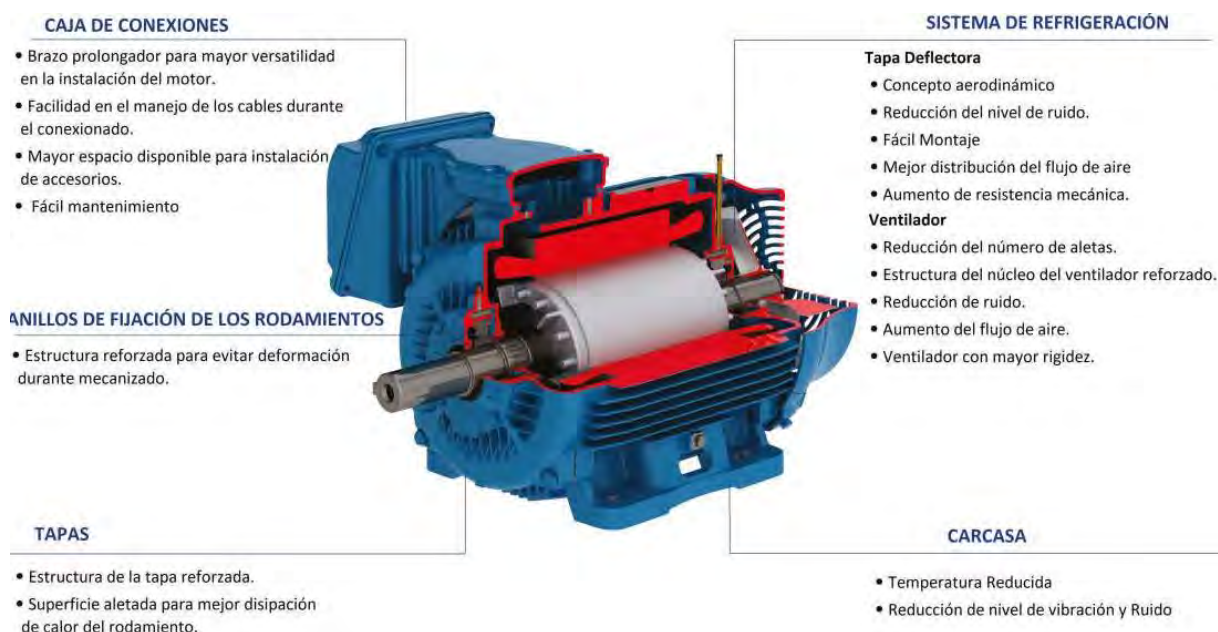
Parámetros del motor trifásico WEG-W22



Nota: Extraído del catálogo WEG (<https://weg.net/institutional/US/es/>)

Figura 62

Características constructivas del motor trifásico WEG22.



Nota: Extraído del catálogo WEG (<https://weg.net/institucional/US/es/>)

5.5 Sistema de regulación de carga

Para la M.C.H. URPAY, se requiere un sistema de control de carga que maneje la potencia eléctrica producida por el generador de inducción, tradicionalmente existen dos métodos utilizados actualmente en Minicentrales Hidroeléctricas:

- Sistema de regulación de velocidad por regulador Oleo mecánico.
- Sistema de control de carga por control de frecuencia. (Este sistema será utilizado en esta instalación).

5.5.1 Sistema de regulación por carga balastro

El sistema de control por carga balastro, llamado también sistema de Regulación Electrónica de carga (o ficticia) consiste en mantener constante la potencia generada; es decir; la máquina funciona a potencia constante:

$$PG = PD + PC \quad (1) \quad (5.2)$$

Donde:

PG: Potencia generada

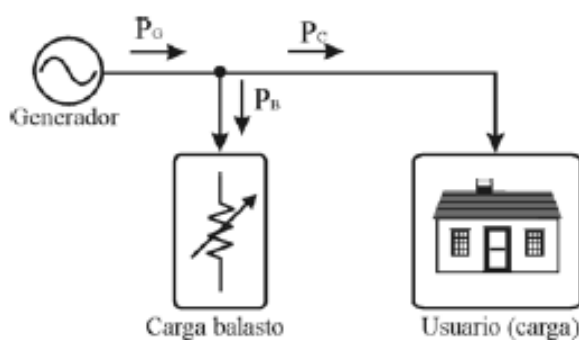
PD: Potencia disipada en la carga balastro

PC: Potencia consumida

La energía no consumida por el usuario se disipa en forma de calor en una o más resistencias denominadas comúnmente “resistencia balastro” (carga lastre o dummy load), ubicadas generalmente en la casa de máquina, como indica la Figura 56

Figura 63

Sistema de regulación por carga balastro



Nota: Fuente: Hechevarria & Bell (2008)

La porción de energía enviada hacia la resistencia balastro es función de la frecuencia de la tensión generada. El sistema de control compara permanentemente la frecuencia generada con un valor de referencia. Si la frecuencia generada es mayor que la de referencia, el sistema deriva más energía hacia las resistencias balastro.

De la misma manera, si la frecuencia generada es menor que la de referencia, el regulador deriva menos energía hacia la resistencia balastro.

Para el control de la potencia disipada en la resistencia balastro, se utiliza normalmente tiristores o *triacs*, como llaves electrónicas. Éstos son conmutados controlando el ángulo de conducción respecto de la onda de tensión generada (lo que se denomina “control por ángulo de fase”). Dicho tipo de control recorta la onda de tensión, limitando de esta forma la potencia



entregada a la carga ficticia. Esta deformación de la forma de onda senoidal, produce armónicas de frecuencia elevada que se traducen en perturbaciones en el espectro de radiofrecuencia (RF), que pueden afectar la recepción de ondas de radio en la zona donde se ubica el aprovechamiento hidroeléctrico.

Una solución alternativa para este problema es la utilización del transistor MOSFET de potencia, operando en conmutación con una frecuencia de operación elevada, mucho mayor que la usada en el control con tiristor.

En este caso, no se disminuye necesariamente la emisión de interferencias electromagnéticas; pero el diseño de filtros utilizados para atenuar tal emisión es más simple que para el tiristor y, por tanto, más económico.

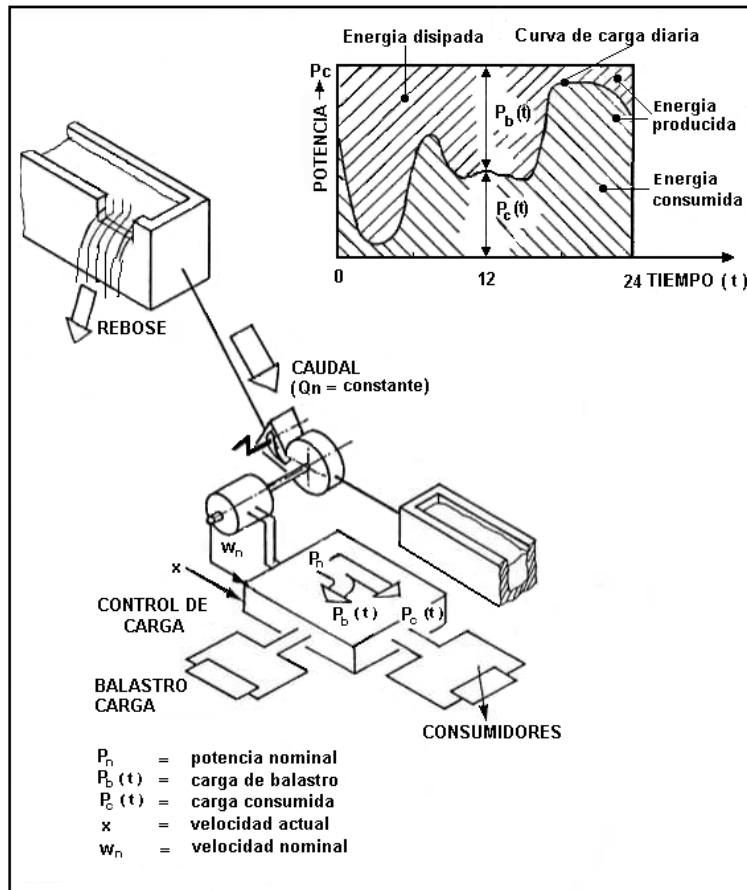
Por otro lado, el uso de MOSFET posibilita dotar al sistema de un control eficaz contra cortocircuitos y efectuar una regulación más fina de la carga. El objetivo de este trabajo es presentar topologías de simple construcción con componentes de bajo costo y de fácil adquisición

También debemos aclarar que, al utilizar este sistema de control de carga, no será necesario utilizar un volante de inercia puesto que la central trabajará a caudal constante sin variaciones de carga ni de caudal que perturben el normal trabajo de los equipos instalados.

A continuación, mostramos un esquema del sistema de regulación propuesto:

Figura 64

Diagrama esquemático básico de un sistema con regulador de carga y curva de carga de Potencia generada



Nota: Fuente: Coz et al. (1995)

5.5.2 Partes del regulador electrónico de carga

a) Circuito sensor de frecuencia: Este circuito lo que hace es entregar un voltaje proporcional a la frecuencia de la tensión generada por el generador de asíncrono para que pueda compararse con otra tensión que hace las veces de Frecuencia de referencia y de allí obtener la señal de error.

Esta forma de censado de error de frecuencia es utilizada debido a la relación directa que existe entre la velocidad mecánica de rotación del generador de inducción y la frecuencia de voltaje que genera. Esta forma de sensar la frecuencia no es la única, ya que en otros casos



se opta por medir el periodo de la onda generada y luego convertirla a una tensión proporcional a la frecuencia.

b) Bloque Controlador: En este conjunto de circuitos se genera la señal de error de frecuencia al efectuar la comparación entre la señal de referencia y la señal medida. La señal de error es utilizada para generar pulsos de disparo que actuarán sobre los SCR o los TRIACS.

Este bloque de procesamiento de señal para cumplir su función tiene Circuitos de Sincronización con la tensión del Alternador, Generadores de función, Amplificadores Lineales, Fuentes de Alimentación regulada etc.

c) Circuitos de disparo y Etapa de potencia: La salida del Controlador tiene que adecuarse sobre los dispositivos de potencia (SCR o TRIACS), primero para proporcionarle mayor potencia utilizando Amplificadores y segundo, efectuando un aislamiento galvánico mediante transformadores de pulso como forma de protección de los circuitos de pequeña señal.

La etapa de Potencia está constituida por los dispositivos de potencia de estado sólido que conmutan la corriente en las resistencias de balastro. Los dispositivos de potencia también acompañados de sus correspondientes circuitos de protección contra Transitorios y también de bobinas de aislamiento de la corriente is.

d) Resistencias de Balastro o Carga secundaria: Está constituido por un conjunto de resistencias de disipación aérea que en su conjunto tienen una capacidad de disipación de 50kW similar a la potencia nominal de generación del sistema que se desea controlar.

Este bloque de procesamiento de señal para cumplir su función tiene Circuitos de Sincronización con la tensión del generador asíncrono, generadores de función, amplificadores lineales, fuentes de alimentación regulada etc.

e) Circuitos de disparo y Etapa de potencia: La salida del Controlador tiene que adecuarse sobre los dispositivos de potencia (SCR o TRIACS), primero para proporcionarle



mayor potencia utilizando Amplificadores y segundo, efectuando un aislamiento galvánico mediante transformadores de pulso como forma de protección de los circuitos de pequeña señal.

La etapa de Potencia está constituida por los dispositivos de potencia de estado sólido que conmutan la corriente en las resistencias de balastro. Los dispositivos de potencia también acompañados de sus correspondientes circuitos de protección contra Transitorios y también de bobinas de aislamiento de la corriente is.

f) Resistencias de Balastro o Carga secundaria: Está constituido por un conjunto de resistencias de disipación al aire que en su conjunto tienen una capacidad de disipación de 50kW similar a la potencia nominal de generación del sistema que se desea controlar. Las resistencias están distribuidas de tal forma que no produzcan corrientes desbalanceadas en el generados asíncrono.

5.6 Tubería forzada.

La tubería forzada de la M.C.H. Urpay actualmente se encuentra en mal estado debido a la antigüedad de esta, se puede observar tramos corrosión, por esta razón será reemplazada por una nueva.

Se utilizará una tubería de acero negro sin costura, la cual tiene mayor capacidad para altas presiones, resistente a temperaturas elevadas, vida útil >30 años, reparable, excelente para instalaciones de bombeo y sistemas hidráulicos, además es ideal para PAT.

5.6.1 Especificaciones de la tubería.

La tubería constituye un componente fundamental en el proyecto, ya que a través de ella se transportará el fluido hídrico necesario para el correcto funcionamiento de la PAT. En este apartado se detallará este aspecto.



Tabla 21

Especificaciones de la tubería de 12”

TUBERIA	
Modelo:	Schedule 40
Diámetro:	12 plg
Espesor nominal:	10.31 mm
Material:	Acero negro sin costura, tri-norma A53 / ASTM A106 / API 5L grado B
Resistencia a la tracción:	60000 PSI (415 MPa)
Peso:	79.71 kg/m

Nota: Elaboración Propia

Tabla 22

Especificaciones de la tubería de 8”

TUBERIA	
Modelo:	Schedule 40
Diámetro:	8 plg
Espesor nominal:	8.18 mm
Material:	Acero negro sin costura, tri-norma A53 / ASTM A106 / API 5L grado B
Resistencia a la tracción:	60000 PSI (415 MPa)
Peso:	42.55 kg/m

Nota: Elaboración Propia



Figura 65

Tubo de acero SCH 40.



Nota: Extraído del catálogo de Fiorella Representaciones (<https://www.fiorellarepre.com.pe/>)

5.7 Válvulas.

Válvula de tipo wafer está diseñada para montaje entre bridas conforme a ASME B16.5 Clase 150. El cuerpo en hierro dúctil ASTM A536 aporta buena resistencia mecánica y tenacidad; el disco en acero inoxidable 316 (CF8M) garantiza resistencia a corrosión y buena durabilidad; el asiento de goma Buna-N (NBR) proporciona un sello fiable para sistemas con agua y fluidos no agresivos, con buenas propiedades de elasticidad para cierre on/off.

5.7.1 Características de la válvula mariposa

Tabla 23

Características de la válvula mariposa

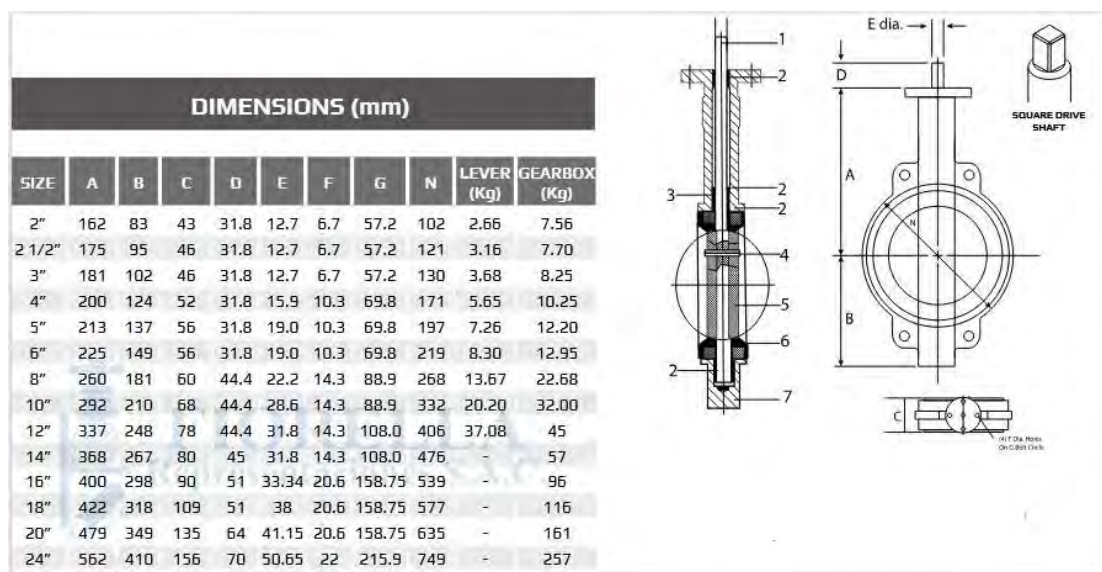
VALVULA MARIPOSA	
Modelo:	Válvula mariposa wafer
Diámetro:	8 plg
Presión nominal:	200 psi (WOG) ~ 13.8 bar
Material del cuerpo:	Hierro dúctil ASTM A536
Material del disco:	Acero inox. 316 (CF8M)
Accionamiento:	Manual / Eléctrico / Neumático / Hidráulico

Nota: Elaboración Propia



Figura 66

Medidas de la válvula mariposa.



Nota: Extraído del catálogo de Fiorella Representaciones (<https://www.fiorellarepre.com.pe/>)



6. CAPÍTULO VI: ANÁLISIS ECONÓMICO

6.1 Generalidades

La Mini Central Hidroeléctrica de Urpay (M.C.H. Urpay), permitirá satisfacer los requerimientos de potencia para la planta agroindustrial a instalar en la zona de la propia M.C.H. Urpay, esta energía permitirá poner en operación los equipos de la planta para la transformación del maíz como materia prima.

6.2 Objetivo de la evaluación económica

El objetivo de la presente evaluación económica es determinar los costos fijos de instalación del kilowatt de potencia instalado (US\$/kW_i) y su costo anual influenciado por los costos variables, así mismo permitirá evaluar el costo de venta de la energía en US\$/kW-hora generado. Posteriormente se determinará los ingresos del proyecto por venta de energía y los egresos por pago del capital y otros gastos operativos que permitan analizar los indicadores económicos del proyecto, con el fin de evaluar su viabilidad económica y comprobar si la inversión necesaria para su implementación se recupera durante el período de vida útil del proyecto.

6.3 Alternativas de generación

Se presentan dos alternativas de generación: la generación hidráulica y la generación térmica, esta última mediante la instalación de un grupo electrógeno de potencia equivalente. La comparación técnico-económica entre ambos tipos de centrales se fundamenta en la necesidad de identificar la opción que ofrezca las mejores condiciones operativas y el menor costo del kW·h generado, el cual será finalmente suministrado a los usuarios.

Ambas opciones de generación constituyen alternativas viables y, para su adecuada selección, es necesario considerar el costo del kW instalado, el número de horas de operación, los costos de operación y mantenimiento, así como otras variables que se desarrollan a continuación.



6.4 Presupuesto base

El presupuesto base del proyecto considera el metrado de todas las obras necesarias para la ejecución del mismo, precisando que los precios consignados corresponden a valores vigentes en el mercado de equipos comerciales tanto de generación hidráulica (bomba como turbina PAT y motor de inducción que operara como generador asíncrono) y térmica (Grupo electrógeno de 100 kW) disponible en el mercado.

El presupuesto base estará conformado por los siguientes puntos:

- a) Presupuesto del Proyecto M.C.H. Urpay.
 - Grupo hidroeléctrico
 - Montaje de equipo electromecánico
 - Obras civiles de rehabilitación:
 - Construcción de Bocatoma.
 - Mantenimiento Canal de aducción.
 - Mantenimiento de desarenador.
 - Mantenimiento de cámara de carga.
 - Mantenimiento de canal de descarga.
 - Habilitación de casa de máquinas.

Los cuadros que se presentan a continuación resumen los costos finales obtenidos en el presente Proyecto.

6.4.1 Presupuesto base de rehabilitación M.C.H. Urpay

La rehabilitación de la M.C.H. Urpay, considera la instalación de un nuevo grupo hidroeléctrico de 100 kW de potencia, el cual será montado en la casa de máquinas actualmente, así como el mantenimiento necesario para poner operativa las obras civiles.



Tabla 24

Metrado y presupuesto de rehabilitación de la M.C.H. Urpay 100 kW

ITEM	DESCRIPCIÓN	Unidad	Cantd.	Costo Unit.	Costo Total
				US \$	US \$
	TUBERIA DE PRESION, REJILLA Y ACCESORIOS				
1.01	Tubería de presión de acero negro sin costura SCH-40 de 12"	m	160	85.00	13,600.00
1.02	Tubería de presión de acero negro sin costura SCH-40 de 8" pulgadas	m	9	57.00	513.00
1.03	Codo para cambio de dirección A1 de plancha acero estructural	Ud	6	65.00	390.00
1.06	Pantalón de tubería de acero con reducciones en acero negro de 12 " a 8".	Ud	1	380.00	380.00
1.08	Rejilla de protección para cámara de carga	Ud	1	280.00	280.00
1.11	Anillos de empuje de acero para anclaje de codo con dado.	Ud	6	45.00	270.00
1.14	Válvula de purga de 60mm diámetro para purga de pozo de acceso, de 10 bar.	Ud	1	125.00	125.00
			Subtotal US\$		15,558.00
	GRUPO HIDROELECTRICO DE GENERACIÓN				
2.01	Bomba como turbina (PAT)	Ud	2	14,798.00	29,596.00
2.02	Regulador de velocidad electronico,	Ud	2	2,400.00	4,800.00
2.03	Válvulas tipo compueta de 8" pulgas de diametro.	Ud	1	1,450.00	1,450.00
2.04	Válvulas de desfogue de 6 pulg de diámetro tipo compuerta.	Ud	2	250.00	500.00
2.05	Tablero de medición, protección y seccionamiento	Ud	2	1,500.00	3,000.00
2.06	Tablero de servicios auxiliares,	Ud	1	780.00	780.00



2.07	Estructura de cimentación para grupo hidroeléctrico	Ud	2	750.00	1,500.00
2.08	Estructura de cimentación de regulador de velocidad.	Ud	1	540.00	540.00
2.09	Conductor NYY 3x150 mm2 para conexión de alternador a tablero de control para 2.4 KV.	Ud	4	184.28	737.12
2.10	Conductor NYY 3X150 mm2 para conexión celda interruptor a transformador de 500kw	Ud	20	184.28	3,685.60
2.11	Sistema de puesta a tierra con accesorios completos	Ud	1	450.00	450.00
				Subtotal US\$	47,038.72
Total				Obra electromecánica	62,596.72
				US \$	
OBRAS CIVILES					
1.00	Trabajos preliminares				2422.57
2.00	Vias de acceso				572.00
3.00	Obras de captación y desarenador				3475.00
4.00	Canal de conducción				4428.85
5.00	Desarenador				2780.00
6.00	Camara de carga				1175.74
7.00	Materiales metálicos tubería forzada				3536.23
8.00	Tubería forzada				3751.63
9.00	Casa de maquinas				4428.85
Total				Obra civil	26570.86
				US \$	
Costo total rehabilitación MCH Urpay		US \$		89,167.58	
COSTO EN US\$ DE KW INSTALADO				891.68	

Nota: Elaboración Propia



6.4.2 Presupuesto base grupo termoeléctrico Diesel

Con la finalidad de efectuar una comparación de las opciones de generación para la planta Agroindustrial, debemos conocer el costo de la instalación de un grupo térmico Diesel de 100 kW, este grupo si operativamente fuera más rentable que la Minicentral Hidroeléctrica sería una alternativa para su instalación, en los puntos posteriores se cuantificará sus costos y gastos y servirá de punto de comparación con la otra alternativa.

Tabla 25

Presupuesto de base de la rehabilitación con un grupo térmico

ITEM	DENOMINACION	UNID.	CANT.	COST.UNIT	COST.PARC.	Total
1	Grupo electrogeno de 100 Kw	Unid	1	19200	19200	
2	Cableado y conexiones	Unid	1	1800	1800	
3	Cimentación de maquinas	Unid	1	3800	3800	
4	Casa de maquinas	Unid	1	4500	4500	
5	Otros menores	Unid	1	1000	1000	
						30300
	SUBTOTAL			Costo	US\$	30300
	COSTO DE GRUPO HIDROELECTRICO	US\$		30300		
	COSTO EN US\$ DE KW INSTALADO			303		

Nota: Elaboración Propia

6.5 Análisis económico de alternativas de generación

6.5.1 Consideraciones generales

Se consideran dos alternativas de generación: la generación hidráulica y la generación térmica. La comparación técnico-económica entre ambos tipos de centrales se basa en la necesidad de determinar la opción que proporcione las mejores condiciones operativas y el menor costo del kW·h generado, el cual será finalmente suministrado a los usuarios.



El análisis comparativo de todas las alternativas de generación se realiza principalmente sobre la base de consideraciones técnicas, las cuales deberán ser respaldadas desde un enfoque económico.

El centro poblado de Urpay presenta cargas características de una región con predominio de consumo doméstico, las cuales se manifiestan en bajos niveles de demanda durante el día y picos de consumo en horario nocturno. Esta condición genera un reducido número de horas de utilización anual, lo que se reflejará directamente en el costo del kW·h producido en nuestro caso la M.C.H. Urpay se comportada como una Planta de Generación Eléctrica de generación Distribuida para uso propio, teniendo como único consumidor la Planta agroindustrial.

6.5.2 Costos fijos y costos variables

El costo de la energía eléctrica entregada en las líneas de salida de la central se determina a partir de los gastos requeridos para su generación, los cuales incluyen un componente fijo y otro variable, este último en función de la carga abastecida.

6.5.2.1 Costos fijos:

Son aquellos costos que guardan relación directa con la construcción y el equipamiento de la central, para lo cual deben considerarse los siguientes aspectos:

- a) Servicio del capital invertido,** que comprende la remuneración y la recuperación del capital, e incluye los siguientes conceptos:
- Intereses: correspondientes a bonos y dividendos de acciones, así como los intereses pasivos generados durante el período de construcción. En el presente caso, se considera una tasa de interés anual de la banca comercial o de fomento comprendida entre el 6 % y el 12 %.



- **Amortización:** consiste en la constitución de un fondo de amortización destinado a establecer una reserva que permita la renovación de la planta una vez cumplida su vida útil. Para este análisis se adopta una tasa de amortización del 2 %.
- b) Cargas tributarias:** presentan una incidencia reducida y no se consideran en los cálculos económicos, dado que, en última instancia, son asumidas por el consumidor final.
- c) Gastos de operación:** incluyen sueldos, herramientas, enseres y derechos de uso del agua, entre otros. Para el presente proyecto se adopta una tasa del 1 %.
- d) Gastos de Mantenimiento y renovación:** abarcan el reemplazo periódico de componentes desgastados y las actividades de mantenimiento preventivo y correctivo planificado, tanto en las obras electromecánicas como en las obras civiles. Estos costos se presentan a partir del segundo o tercer año de operación, alcanzando tasas anuales del orden del 1 % al 2 %.

La suma de los costos fijos descritos resulta en una tasa global comprendida entre el 12 % y el 15 %, valor considerado aceptable para centrales eléctricas. En este proyecto realizando la sumatoria de los intereses 9 %, la amortización 2%, gastos de operación 1% y gastos de mantenimiento del 2%, nos da como resultado una suma del 14%.

6.5.2.2 Costos variables:

Dentro de los costos variables se consideran los siguientes aspectos:

- a) Gastos por combustible utilizado:** este componente resulta determinante en el costo de producción de las centrales térmicas, ya que, en función del número de horas de operación, influye directamente en el costo del kW·h generado. En el caso de las centrales hidráulicas, este gasto es nulo.
- b) Gasto de lubricantes:** en comparación con los costos de combustible, el gasto asociado a lubricantes es prácticamente insignificante.



- c) **Consumo específico de combustible:** está condicionado por la eficiencia del grupo generador y el tipo de combustible empleado; en las centrales térmicas se utiliza generalmente petróleo diésel DB5.
- d) **El número de horas de utilización:** depende de la demanda del mercado y de las características de los usuarios del servicio de energía eléctrica. En el presente caso la Planta Agroindustrial de Urpay.

6.5.2.3 Costos totales:

Los costos totales, expresados como gastos anuales, corresponden a la suma de los costos fijos y variables. Los costos fijos comprenden el costo total de la central, afectado por los coeficientes de interés, amortización y depreciación, considerando además los gastos de reparación y mantenimiento programados. Este tipo de gastos, correspondientes a un período anual, se asumen proporcionales al capital invertido en la instalación. En consecuencia, los costos fijos anuales, que incluyen la remuneración del capital, la amortización y otros conceptos asociados, se determinan mediante la siguiente relación:

$$Gf = P_{max} \cdot i \quad (6.1)$$

Donde:

Gf = Gastos fijos

Pmax = Potencia máxima de la central (kW)

i = Costo de la instalación por kW de potencia instalada (US\$/kW)

p = Coeficiente de interés y amortización de capital

Por su parte, los costos variables están vinculados al gasto de combustible, expresado en US\$, necesario para producir 1 kW·h, así como al tiempo de operación anual de la central, determinado por el número de horas de utilización. Estos costos se calculan mediante la siguiente relación:

$$Gv = P_{max} \cdot c \cdot h \quad (6.2)$$



Donde:

c = Costo de combustible en US\$/kW-hora

h = Número de horas de utilización anual (horas)

P_{max} = Potencia máxima de la central (kW).

Los gastos totales que demanda la operación de las centrales durante un año serán:

$$G = G_f + G_v = P_{max} * i * p + P_{max} * c * h \quad (6.3)$$

Si los gastos totales se expresan en función de 1 kW de potencia instalada, el gasto anual unitario, en dólares por potencia instalada (US\$/kW_i), estará dado por:

$$\frac{G}{P_{max}} = i * p + c * h \quad (6.4)$$

Si la expresión anterior se divide entre el número de horas de utilización anual, el costo en US\$ por kW·h generado se obtiene como:

$$g = \frac{G}{h * P_{max}} = \frac{i * p}{h} + c \quad (6.5)$$

La representación gráfica del análisis de la ecuación 6.4 permite evaluar la tendencia de variación de los costos fijos y variables asociados a la implementación y operación de los dos tipos de centrales de generación considerados. Asimismo, mediante la ecuación 6.5 es posible analizar el comportamiento del costo del kW·h generado a lo largo del tiempo, en función del número de horas de utilización de la central.

6.5.3 Determinación de costos de kWh instalado y kWh producido.

A partir del análisis económico de los costos fijos y variables realizados, es posible extraer una serie de conclusiones que permiten determinar la alternativa de generación más conveniente desde el punto de vista económico.

Una vez establecidos los costos totales de la instalación y definidos los factores correspondientes a las tasas de interés y amortización aplicadas por las entidades financieras, se presentan los valores de la alternativa hidroeléctrica en la Tabla 26 y se representa



gráficamente la ecuación N° 6.4 en función del número de horas de utilización anual (h), tal como se muestra en la Figura 60.

Tabla 26

Costo del kWh

h	i	p	C	g
500	0.14	891.68	124.83	0.250
1000	0.14	891.68	124.83	0.125
1500	0.14	891.68	124.83	0.083
2000	0.14	891.68	124.83	0.062
2500	0.14	891.68	124.83	0.050
3000	0.14	891.68	124.83	0.042
3500	0.14	891.68	124.83	0.036
4000	0.14	891.68	124.83	0.031
4500	0.14	891.68	124.83	0.028
5000	0.14	891.68	124.83	0.025
5500	0.14	891.68	124.83	0.023
6000	0.14	891.68	124.83	0.021
6500	0.14	891.68	124.83	0.019
7000	0.14	891.68	124.83	0.018
7500	0.14	891.68	124.83	0.017
8000	0.14	891.68	124.83	0.016
8500	0.14	891.68	124.83	0.015
8760	0.14	891.68	124.83	0.014

Nota: Elaboración Propia

De igual manera, se puede realizar la evaluación de la ecuación N.º 6.5, a partir de la cual se presentan los valores correspondientes a ambas alternativas en la Tabla 27 para el grupo térmico, así como la variación del costo del kW·h generado a lo largo del año en función del número de horas de utilización anual para las dos alternativas de generación seleccionadas, tal como se ilustra en la Figura 63.



Tabla 27

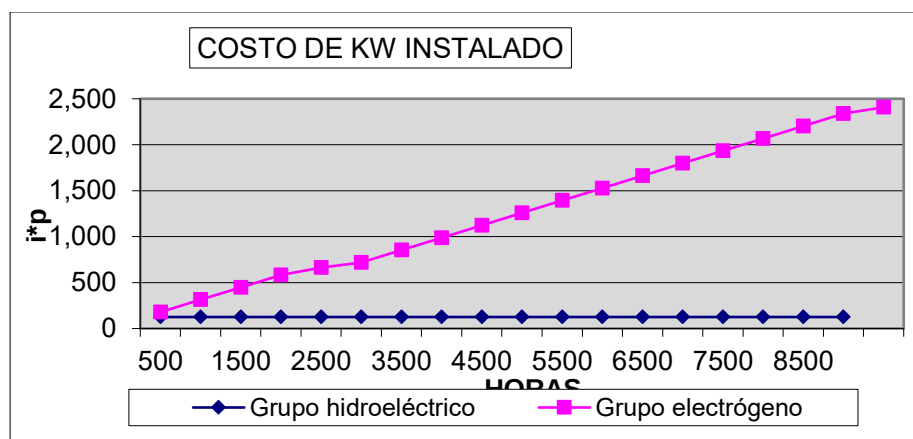
Costo del kWh generado por el grupo diésel

h	i	p	c	C	g ter	g hidro	LCOE Hidro	g else
500	0.14	303	0.27	177.42	0.355	0.250	249.67	0.22
1000	0.14	303	0.27	312.42	0.312	0.125	124.83	0.22
1500	0.14	303	0.27	447.42	0.298	0.083	83.22	0.22
2000	0.14	303	0.27	582.42	0.291	0.062	62.42	0.22
2300	0.14	303	0.27	663.42	0.288	0.050	49.93	0.22
2500	0.14	303	0.27	717.42	0.287	0.050	49.93	0.22
3000	0.14	303	0.27	852.42	0.284	0.042	41.61	0.22
3500	0.14	303	0.27	987.42	0.282	0.036	35.67	0.22
4000	0.14	303	0.27	1122.42	0.281	0.031	31.21	0.22
4500	0.14	303	0.27	1257.42	0.279	0.028	27.74	0.22
5000	0.14	303	0.27	1392.42	0.278	0.025	24.97	0.22
5500	0.14	303	0.27	1527.42	0.278	0.023	22.70	0.22
6000	0.14	303	0.27	1662.42	0.277	0.021	20.81	0.22
6500	0.14	303	0.27	1797.42	0.277	0.019	19.21	0.22
7000	0.14	303	0.27	1932.42	0.276	0.018	17.83	0.22
7500	0.14	303	0.27	2067.42	0.276	0.017	16.64	0.22
8000	0.14	303	0.27	2202.42	0.275	0.016	15.60	0.22
8500	0.14	303	0.27	2337.42	0.275	0.015	14.69	0.22
8760	0.14	303	0.27	2407.62	0.275	0.014	14.25	0.22

Nota: Elaboración Propia

Figura 67

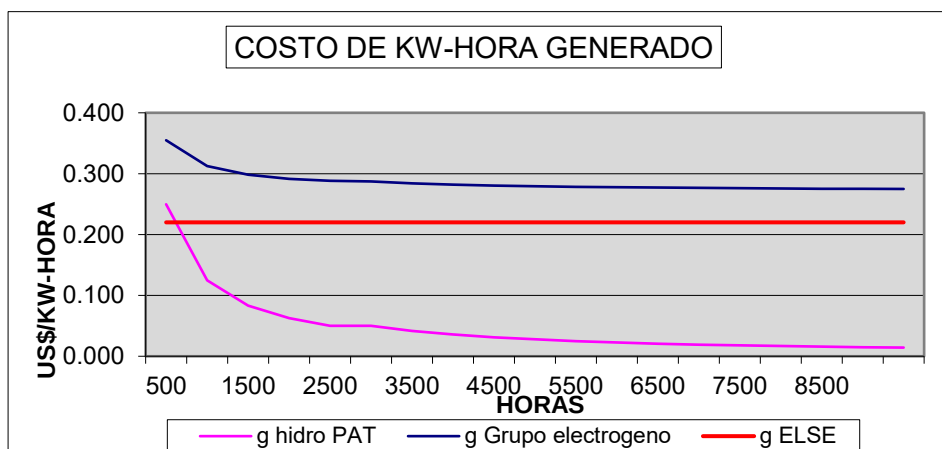
Costo del kW instalado hidroeléctrico Vs. Electrónico



Nota: Elaboración Propia

Figura 68

Comparación del costo del kWh generado



Nota: Elaboración Propia

6.5.4 Discusión de la evaluación económica.

Las ecuaciones y los gráficos mostrados en el punto anterior, permiten visualizar la tendencia que toman los costos fijos y costos variables a lo largo de un año de operación. En el caso de la figura 67, podemos evaluar el comportamiento de la central hidroeléctrica frente a la alternativa central termoeléctrica. En esta grafica podemos observar que existe punto de corte entre las curvas a las 500 horas, quiere decir que la M.C.H. Urpay tiene menor costo anualizado que el grupo térmico a partir de un uso aproximado de 500 horas de uso al año, para menor tiempo de uso sería más ventajoso utilizar un grupo térmico. Entonces la propuesta es viable cuando se de mayor tiempo de uso a la instalación de la M.C.H Urpay.

El gráfico presentado en la Figura 68 permite analizar el comportamiento de las curvas del costo del kW·h generado, observándose una tendencia decreciente a medida que aumenta el número de horas de utilización, se puede observar que la curva de costos de la M.C.H. Urpay siempre es menor que la alternativa térmica, sobre todo si tenemos en cuenta que la utilización de una central hidráulica estarán alrededor de las 3000 horas anuales, este gráfico también permitirá predecir el costo de del kW/h generado por la central que podrá estar en 0.015 el kW/h generado.



6.6 Evaluación económica financiera del proyecto

6.6.1 Indicadores económicos utilizados

Para la evaluación económico-financiera del proyecto es necesario realizar una proyección de todos los ingresos y egresos que se generen a lo largo de su vida útil, la cual, en este caso, se considera de quince años por tratarse de una rehabilitación.

En el análisis económico del proyecto se empleará el método dinámico para el cálculo de su rentabilidad, el cual toma en cuenta la diferencia temporal de los flujos de pago. En este enfoque, todos los ingresos y egresos asociados a la inversión se actualizan a la fecha de puesta en operación del proyecto, considerada como tiempo cero.

Las variables que intervienen en esta evaluación son las siguientes:

Tasa de descuento: Para los cálculos económicos, se utilizará el dólar estadounidense como unidad monetaria. Se establecerá una tasa de interés comercial o de fomento entre el 12% y el 15%, que representa el valor promedio a nivel mundial. En este caso, se tomará un 14% como tasa de descuento.

Vida útil de la planta: Este parámetro es fundamental para el análisis de la rentabilidad del proyecto y se define a partir de referencias reales de otras plantas que se encuentran o se han encontrado en operación. La vida útil depende principalmente de la calidad de los equipos instalados y de las obras civiles ejecutadas. Para el presente proyecto, al tratarse de una rehabilitación, se considera una vida útil de 16 años.

Gastos de inversión: Representan el monto total de las inversiones requeridas para la puesta en marcha y ejecución del proyecto.

Valor residual de la planta: Corresponde al valor económico asignado a la planta al finalizar su vida útil o el período de operación establecido en el proyecto.

Costos de operación y mantenimiento: Resulta complejo estimar con precisión los gastos asociados al mantenimiento y las reparaciones necesarias para asegurar la continuidad



operativa de la planta. En este estudio se considera que un costo anual equivalente al 3 % de la inversión inicial es suficiente para cubrir de manera confiable dichos requerimientos.

Costos de recursos energéticos: En el caso de las centrales termoeléctricas, este concepto corresponde al costo del combustible requerido por cada kW·h generado. Para la central hidroeléctrica, este gasto es nulo, dado que el recurso hídrico se encuentra disponible de forma directa y gratuita, en la cantidad y calidad necesarias.

Egresos corrientes totales: Es la suma de todos los costos explicados anteriormente.

6.6.1.1 Ingresos del proyecto de inversión:

Para este caso se obtiene los siguientes ingresos:

Procedente del ahorro de energía como consecuencia de no utilizar grupos diésel.

Ingresos: procedentes de la comercialización o uso propio de bienes producidos (energía generada): Estos ingresos se estiman mediante la proyección de las ventas de energía a lo largo de la vida útil del proyecto, energía que será íntegramente consumida por la agroindustria.

Retornos Brutos: Los retornos brutos anuales se obtienen a partir del saldo entre los ingresos y los egresos. Se emplea la denominación brutos para indicar que estos valores incluyen las depreciaciones.

Depreciaciones: Representan la pérdida de valor periódica de los activos fijos asociados al proyecto en estudio.

Utilidades: Corresponden a la ganancia obtenida en cada período, vinculada a la inflación y a la tasa de interés total aplicada a la inversión.

Tasa general de Inflación/tasas de interés real: Para efectos de un análisis teórico, se asume que los precios actuales se mantienen constantes en el tiempo (expresados en dólares). Esta hipótesis permite calcular la rentabilidad del proyecto sobre la base de retornos anuales constantes.



6.6.2 Calculo de ingresos y desembolsos

El desempeño económico-financiero del proyecto deberá analizarse desde la perspectiva de un negocio de generación eléctrica, considerando el comportamiento operativo de la MCH Urpay que suministrará energía a la planta agroindustrial.

6.6.2.1 Cálculo de ingresos.

El cálculo de los ingresos se basará exclusivamente en la venta de energía eléctrica a la planta agroindustrial planteada, que se muestra a continuación:

Tabla 28

Venta de energía M.C.H. Urpay

Años	Energía (kW-h)	anual	Costo (US\$)	kW-h	Costo (S/.)	kW-h	Ingresos (US\$)
2026	0.00		0.015		0.525		0
2027	250,470.00		0.015		0.525		37,570.50
2028	250,470.00		0.015		0.525		37,570.50
2029	250,470.00		0.015		0.525		37,570.50
2030	250,470.00		0.015		0.525		37,570.50
2031	250,470.00		0.015		0.525		37,570.50
2032	250,470.00		0.015		0.525		37,570.50
2033	250,470.00		0.015		0.525		37,570.50
2034	250,470.00		0.015		0.525		37,570.50
2035	250,470.00		0.015		0.525		37,570.50
2036	250,470.00		0.015		0.525		37,570.50
2037	250,470.00		0.015		0.525		37,570.50
2038	250,470.00		0.015		0.525		37,570.50
2039	250,470.00		0.015		0.525		37,570.50
2040	250,470.00		0.015		0.525		37,570.50
2041	250,470.00		0.015		0.525		37,570.50

Nota: Elaboración Propia



6.6.2.2 Cálculo de desembolsos

Los costos totales de inversión se establecen como la suma del capital fijo y el capital de explotación neta que serán destinados a la rehabilitación de la MCH Urpay.

Tal como se indicó previamente, los activos fijos comprenden las inversiones fijas y los costos de capital incurridos antes de la puesta en servicio, e incluyen los siguientes conceptos:

- Inversiones fijas
- Gastos de capital previos a la producción
- Capital de explotación neta.
- Amortización de la deuda
- Costos de Operación y Mantenimiento

6.6.3 Financiación del proyecto.

La asignación de recursos financieros al proyecto constituye un requisito previo, evidente y fundamental para su materialización. En ese sentido, el estudio de viabilidad carecería de utilidad si no estuviera sustentado en justificaciones razonables que permitan obtener conclusiones viables y satisfactorias.

Participación de capital propio de los usuarios de Urpay mediante prestamos bancario.

6.7 Calculo de rentabilidad por métodos dinámicos

6.7.1 Valor Actual Neto (VAN)

El Valor Actual Neto (VAN), también conocido como Valor Presente Neto (VPN), es la diferencia entre el valor actualizado de los flujos de caja futuros que generará un proyecto y la inversión inicial. La fórmula del VAN es la siguiente:

$$VAN = -I_0 + \frac{FC_1}{(1+k)} + \frac{FC_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+n)^n} \quad (6.6)$$

Donde:

- I_0 : Inversión inicial del proyecto.
- FC_1 : Flujo de caja en el período t.



- k: Tasa de descuento o de actualización, que representa la rentabilidad mínima exigida al proyecto (costo de capital).

Criterio de Decisión:

- Si $VAN > 0$, el proyecto es rentable y se acepta. Los flujos de caja futuros actualizados superan la inversión inicial.
- Si $VAN = 0$, el proyecto es indiferente, no genera ni pérdidas ni ganancias. La rentabilidad es igual a la tasa de descuento.
- Si $VAN < 0$, el proyecto no es rentable y se rechaza. Los flujos de caja actualizados son menores que la inversión inicial.

6.7.2 Tasa Interna de Retorno (TIR)

a Tasa Interna de Retorno (TIR) se define como la tasa de descuento que iguala a cero el Valor Actual Neto (VAN) de un proyecto y expresa la rentabilidad anual del mismo en términos porcentuales.

La TIR es el valor de "k" que satisface la siguiente ecuación:

$$0 = -I_0 + \frac{FC_1}{(1+TIR)} + \frac{FC_2}{(1+TIR)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+TIR)^n} \quad (6.7)$$

Para calcular la TIR, generalmente se recurre a software financiero o a métodos de prueba y error, ya que no se puede despejar directamente de la fórmula.

Criterio de Decisión:

Para que un proyecto sea aceptado, su TIR se compara con la tasa de descuento (k).

- Si $TIR > k$, el proyecto es rentable y se acepta.
- Si $TIR = k$, el proyecto es indiferente.
- Si $TIR < k$, el proyecto no es rentable y se rechaza.

De acuerdo a los valores obtenidos en el flujo de caja, podemos afirmar que el valor del VAN del proyecto es de US\$ 82,922 y el TIR asciende al 32%, que son valores razonables.



Tabla 29

Flujo de ingresos y egresos M.C.H. Urpay

Año	Venta de energía	Valor de Recup	Ingresos totales (US\$)	Inversión	Amortiza	Costo de Operación	Costo de Manten.	Egresos Totales (US\$)	Flujo Económico	Flujo Acumulado
2026	0.00		0.00	89,167.58		0.00	0.00	89,167.58	-89,167.58	-89,167.58
2027	37,570.50		37,570.50		8,916.76	1,783.35	0.00	10,700.11	26,870.39	-62,297.19
2028	37,570.50		37,570.50		8,916.76	1,783.35	445.84	11,145.95	26,424.55	-35,872.64
2029	37,570.50		37,570.50		8,916.76	1,783.35	1,783.35	12,483.46	25,087.04	-10,785.60
2030	37,570.50		37,570.50		8,916.76	1,783.35	1,783.35	12,483.46	25,087.04	14,301.44
2031	37,570.50		37,570.50		8,916.76	1,783.35	1,783.35	12,483.46	25,087.04	39,388.47
2032	37,570.50		37,570.50		8,916.76	1,783.35	1,783.35	12,483.46	25,087.04	64,475.51
2033	37,570.50		37,570.50		8,916.76	1,783.35	1,783.35	12,483.46	25,087.04	89,562.55
2034	37,570.50		37,570.50		8,916.76	1,783.35	1,783.35	12,483.46	25,087.04	114,649.59
2035	37,570.50		37,570.50		8,916.76	1,783.35	1,783.35	12,483.46	25,087.04	139,736.63
2036	37,570.50		37,570.50		8,916.76	1,783.35	1,783.35	12,483.46	25,087.04	164,823.67
2037	37,570.50		37,570.50		8,916.76	1,783.35	1,783.35	12,483.46	25,087.04	189,910.70
2038	37,570.50		37,570.50		8,916.76	1,783.35	1,783.35	12,483.46	25,087.04	214,997.74
2039	37,570.50		37,570.50		8,916.76	1,783.35	1,783.35	12,483.46	25,087.04	240,084.78
2040	37,570.50		37,570.50		8,916.76	1,783.35	1,783.35	12,483.46	25,087.04	265,171.82
2041	37,570.50	8,916.76	46,487.26		8,916.76	1,783.35	1,783.35	12,483.46	34,003.80	299,175.62
			572,474.26		133,751.37			273,298.64		
									VAN	TIR
									\$76,771.81	28%

Nota: Elaboración Propia

El Período de Recuperación Descontado (PRD) es el período que requiere un proyecto para recuperar la inversión inicial realizada, pero utilizando los flujos de caja ya actualizados. Este método tiene en cuenta el valor del dinero en el tiempo, a diferencia de su versión simple.

Criterio de Decisión:

- Si el PRD es menor que el plazo máximo de recuperación establecido por la empresa, el proyecto es viable.
- Si el PRD es mayor que el plazo máximo establecido, el proyecto se rechaza.

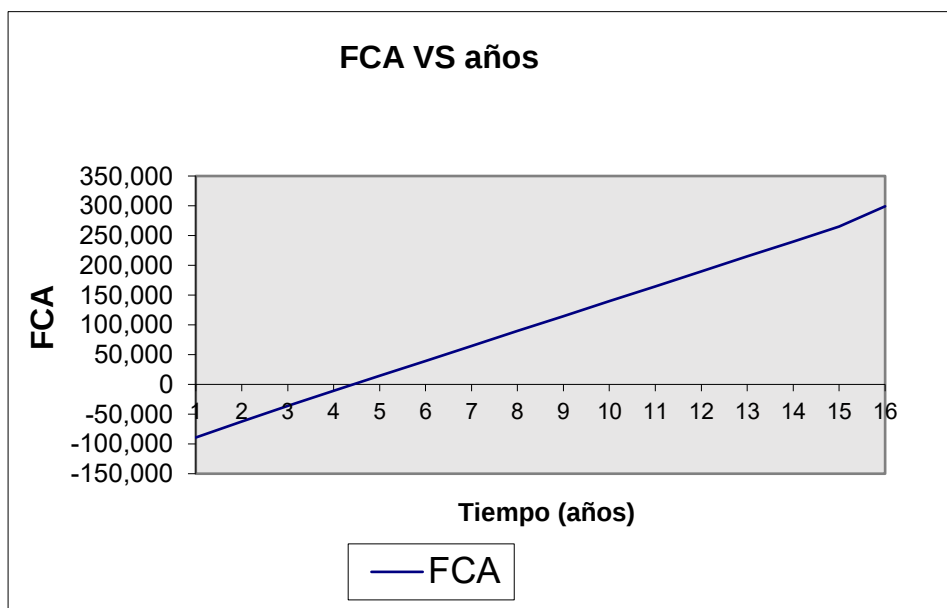
Aunque es una herramienta útil, no considera los flujos de caja que ocurren después de la recuperación de la inversión.

En el presente análisis económico podemos afirmar que el periodo de recuperación PRD se produce a los 04 años, que es un tiempo razonable.



Figura 69

Flujo de caja acumulado en el tiempo



Nota: Elaboración Propia

Los principales indicadores del análisis económico lo mostramos en tabla siguiente:

Figura 70

Resultados del análisis económico

Tasa Interés	0.14
VAN (fp)	76,771.81
TIR (fp)	0.28
PO TIME	4 años 5 me
Max Expo	89,167.58

Nota: Elaboración Propia



CONCLUSIONES

- En el presente trabajo de investigación tecnológica, se demostró que en el presente Proyecto de la Minicentral Hidroeléctrica de Urpay de 100 kW, es técnicamente viable la utilización de bombas centrífugas operando como turbinas (PAT), aprovechando el recurso hídrico de la cuenca disponible y reutilizando parte de la infraestructura hidráulica existente, lo que valida el cumplimiento del objetivo general de la investigación. Los parámetros hidráulicos para el diseño de la MCH Urpay son; caudal Q de 0.2 m³/s, altura bruta H_b de 107.81 m, altura neta H de 100 m y se utilizara 02 grupos hidroeléctricos. Esta minicentral podrá operar bajo las condiciones de generación distribuida o independiente para uso agroindustrial.
- El análisis de la demanda energética de la planta agroindustrial de procesamiento de maíz permitió determinar de manera confiable una potencia instalada de 100 kW para el suministro de energía eléctrica a la planta. En el diagrama de carga desarrollado para la instalación se determinó que la planta alcanzara una potencia máxima de 85.3 kW, potencia media de 45.38 kW, energía consumida diaria de 1089 kW-Hora, factor de carga F_c 0.53, factor de planta F_p 0.45, y el número de horas de utilización diaria será de 12.77 horas, estos ratios operativos podrían ser mejorados en caso que se incremente maquinas o se trabaje a 2 turnos.
- En el proceso de selección de la bomba operando en modo turbina, se ha aplicado 2 metodologías reconocidas para la selección de esta, uno es método de Sharma, pondera una evaluación en diferentes escenarios de velocidad especifica del grupo hidroeléctrico para determinar la relación de caudal y altura en modo bomba y el método de Chapallaz, pondera la velocidad especifica de la bomba y utiliza gráficos de correlación los cuales están basados en datos experimentales, por lo tanto con los datos hallados en Sharma en modo bomba $H = 98.6$ m y $Q = 0.097$ m³/s y en modo turbina de



$H_t = 100$ m, $Q_t = 0.1$ m³/s por unidad, potencia eléctrica de 73.55 kW, permitieron identificar una PAT adecuada la cual es una bomba centrífuga radial ISO 2858 modelo 125-400, con eficiencia de 0.74 y velocidades compatibles con generador asíncrono a 1790 rpm.

- En el análisis del motor asíncrono operando como generador asíncrono, se ha determinado que se utilizará un motor eléctrico tipo jaula de ardilla Motor trifásico WEG-W22 Carcasa de Hierro Gris - Premium Efficiency - IE3 de una potencia de 75 kW a 1783 rpm, que contará con un tablero electrónico de control de carga para generar energía eléctrica a 60 Hz y un voltaje nominal de 220/380 Volts. La regulación de carga será administrada por el mismo sistema electrónico de control con un sistema de disipación de carga por balastro para cada grupo hidroeléctrico.
- En el análisis económico se ha desarrollado el comportamiento de los costos fijos y variables de la MCH Urpay 100 kW comparado con un grupo electrógeno de la misma potencia y el costo de generación de la empresa distribuidora (ELSE). El costo por kW instalado de la MCH Urpay es de 891.68 US\$/kW_i, y el costo del kW instalado del grupo térmico es de 303 US\$/kW_i, valores que están dentro de los estándares nacionales. Del análisis de los costos de generación, se ha determinado que, la MCH Urpay generaría a un costo de 0.015 US\$ el kW-hora y el grupo térmico tendría un costo de 0.285 US\$ el kW-hora, y la empresa distribuidora ELSE tiene un costo de 0.22 US\$ el kW-hora, lo que demuestra el menor costo de energía generada del kW-hora de la MCH Urpay. De los ingresos y egresos generados por la MCH Urpay para un horizonte de 15 años de operación en el análisis económico se determina que el proyecto para una tasa de interés del 14% produce un VAN de US\$. 76,771.81 y un TIR de 28%, así mismo el periodo de pago será de 4 años y medio con una máxima exposición de US\$. 89167.58 ratios que demuestran que el proyecto es rentable.



RECOMENDACIONES

- Se recomienda considerar el presente estudio de reacondicionamiento como una referencia técnica para futuros proyectos de recuperación, rehabilitación y construcción de minicentrales hidroeléctricas, especialmente aquellas que utilicen bombas centrífugas operando como turbinas (PAT). Asimismo, el estudio puede servir como guía metodológica para entidades públicas y gobiernos regionales interesados en el desarrollo de proyectos hidroeléctricos de pequeña potencia orientados a la generación distribuida.
- Se recomienda que futuros proyectos de rehabilitaciones o construcciones nuevas de centrales hidroelectricas que utilicen bombas como turbina se debe propiciar la participacion multidisciplinaria de tesisistas de las especialidades de ingenieria electrica y electronica para realizar estudios completos.



BIBLIOGRAFÍA

- Alatorre-Frenk, C., & Thomas, T. (1990). The pumps as turbines approach to small hydropower. *World Congress on Renewable Energy*.
- Apaza Huaquisto, G. A. (2018). *Utilización de turbinas-bomba en sistemas de distribución de agua* [Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8401>
- Atayupanqui Huaman, C. C. (2019). *Reacondicionamiento de la Mini Central Hidroeléctrica de Urcos-Urcos-Cusco para una potencia de 400 kw* [Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. <http://hdl.handle.net/20.500.12918/4488>
- Barbarelli, S., Amelio, M., & Florio, G. (2016). Predictive model estimating the performances of centrifugal pumps used as turbines. *Energy*, 107, 103–121. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.122>
- Brito A., I. S. (2020). *Sistema de bombeo en la industria petrolera*. Tecnológico Nacional de México.
- Carravetta, A., Derakhshan Houreh, S., & Ramos, H. M. (2018). *Pumps as Turbines*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-67507-7>
- Carvalho Viana, A. N., & Horta Nogueira, F. J. (2002). Bombas de fluxo operando como turbinas - Procedimento de seleção. *Encontro de Energia No Meio Rural*.
- Catacora Acevedo, E. A. (n.d.). Fundamentos de turbinas hidráulicas. *Turbomáquinas II*.
- Chapallaz, J.-Marc., Eichenberger, Peter., & Fischer, Gerhard. (1992). *Manual on pumps used as turbines*. Vieweg.
- Coz, Federico., Sánchez Sánchez, Teodoro., & Ramírez-Gastón, Javier. (1995). *Manual de mini y microcentrales hidráulicas: Una guía para el desarrollo de proyectos*. Intermediate Technology Development Group.



- Derakhshan, S., & Nourbakhsh, A. (2008). Theoretical, numerical and experimental investigation of centrifugal pumps in reverse operation. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32(8), 1620–1627. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2008.05.004>
- Emilio, & Barreira. (2006). *Uso de bombas funcionando como turbinas para sistemas de recalque de agua*.
- Fernández Díez, P. (2006). *Turbinas hidráulicas*.
- Garcia, R. (2015). *Turbomaquinas*. SlidePlayer. <https://slideplayer.es/slide/146380>
- Hechevarria, M., & Bell, O. (2008). *Control de frecuencia en centrales minihidroeléctricas aislada*. Universidad de Oriente.
- Hidrostal. (2015). *BOMBA CENTRIFUGA ISO 2858*.
- Llamas Terrés, A., Flores Cruz, J. J., Treviño, B., Luján, J. I., & López Salinas, J. L. (2005). *Plantas mini hidroeléctricas con bombas centrifugas y motores de inducción*.
- Loza Chucalta, G. C., & Mormontoy Ruelas, D. E. (2024). *Evaluación de aprovechamiento hidroeléctrico mediante la implementación de turbinas en líneas de conducción del sistema de agua potable en la ciudad de Arequipa* [Universidad Católica San Pablo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12590/18186>
- Mataix y Plana, C. (1986). *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas* (S. A. Ediciones del Castillo, Ed.).
- Orlando Anibal, A. (2011). *Bombas Utilizadas Como Turbinas*.
- Stepanoff, A. J. . (1993). *Centrifugal and axial flow pumps : theory, design, and application*. Krieger Pub. Co.
- Viedma Robles, A., & Zamora Parra, B. (1997). *Teoria de Las Maquinas Hidráulicas*. EDITUM.
- Williams, A. (1995). *Pumps as turbines: A user's guide*. Intermediate Technology.



ANEXOS

Anexo 01: Matriz de consistencia

	PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES	METODOLOGÍA
GENERAL	¿Es posible realizar un proyecto M.C.H. Urpay para poder generar energía eléctrica con fines agroindustriales, utilizando tecnología de generación alternativa como son las bombas como turbina?	Efectuar el estudio de ingeniería para la M.C.H. Urpay haciendo uso de tecnología de generación alternativa como son las bombas como turbinas (PAT) y suministrar la energía hidroeléctrica producida a una planta agroindustrial.	El desarrollo del proyecto de la M.C.H. Urpay de 100 kW permitirá plantear un sistema de generación de energía hidroeléctrica utilizando bombas como turbina generando 100 kW de potencia para suministrar a una planta con fines agroindustriales.	- Variables independientes Q: caudal de diseño (m³/seg). H: altura neta (m). η: eficiencia de la bomba (%). N: velocidad de rotación (RPM). - Variable dependiente Pe: Potencia al eje de la turbina (kW). PEE: Potencia eléctrica (kW)	METODO: TIPO, NIVEL Y DISEÑO DE LA INVESTIGACION. - ENFOQUE: Cuantitativo - TIPO: Aplicada o tecnológica. - NIVEL: Exploratoria, descriptiva, correlacional y explicativa - DISEÑO: No experimental.
ESPECIFICO	¿Es posible efectuar el análisis de la demanda de energía a partir de la instalación de una planta agroindustrial?	Desarrollar el análisis de carga y de demanda de energía para una planta agroindustrial de procesamiento de maíz y derivados.	El análisis de la carga y demanda de energía de la planta agroindustrial permitirá determinar los parámetros operativos del sistema eléctrico como son máxima potencia, energía consumida diaria, factor de carga y horas de utilización.		
	¿Sera posible recalcular las condiciones operativas de la tubería de presión y definir la composición de los grupos hidroeléctricos con tecnología alternativa?	Realizar el cálculo hidráulico de la nueva tubería de presión y desarrollar el proceso analítico para determinar los parámetros operativos de las bombas que trabajaran como turbinas.	El diseño hidráulico de la tubería de presión y el desarrollo analítico que permita determinar los parámetros de las PAT permitirán definir las características del equipamiento mecánico de la M.C.H. Urpay.		
	¿De qué manera se podría evaluar el uso de máquinas asíncronas que puedan generar electricidad con algún sistema de control adecuado?	Desarrollar un análisis técnico y determinar los parámetros eléctricos para la utilización y selección de motores asíncronos como generadores asíncronos y plantear su sistema de control.	La determinación de los parámetros eléctricos para la selección de motores asíncronos como generadores asíncronos y su sistema de control permitirán determinar las características operativas del grupo hidroeléctrico.		
	¿Es posible desarrollar un análisis económico para evaluar costos de instalación y rentabilidad de la planta a rehabilitar?	Analizar los costos fijos, variables y costos de kW-hora producido por la M.C.H. Urpay y desarrollar el análisis de rentabilidad financiera de la instalación.	La evaluación de los costos del kW instalado, costos de kW-hora generado, e índices de rentabilidad (VAN y el TIR) permitirán conocer la rentabilidad del proyecto.		



Anexo 02: Fotos

Casa de máquinas en la actualidad





Tubería forzada en la actualidad





Canal de desfogue





Anexo 03: Cotizaciones



SOLUCIONES CON TECNOLOGÍA

Oferta No. JAT-0556-26

Lima, 10 de junio de 2026

Señores
ORUGA TECH EIRL
Presente.-

Atención : EDGAR CATAORA

Referencia : BOMBA HIDROSTAL DE 80 LPS - 75 METROS - 125HP 4POLOS 1770 RPM

Estimados señores:

Atendiendo su solicitud de cotización de la referencia y de acuerdo a los datos proporcionados por ustedes, nos es grato cotizarles como sigue:

ÍTEM 01: DESCRIPCIÓN GENERAL

Bomba centrífuga, marca Hidrosta!, fabricada en el Perú, con certificación ISO 9001 e ISO 14001. Caja de bomba con succión axial y descarga radial. Soporte construido en fierro fundido con rodamientos lubricados por grasa. Base común de acero estructural para montaje horizontal bomba-motor. Sistema de transmisión mediante acoplamiento directo con su respectivo guarda acople. Motor eléctrico, asíncrono, trifásico, marca General Electric, totalmente cerrado y forma constructiva horizontal. Opera en instalaciones trifásicas de 60Hz, con arranque directo o estrella - triángulo y temperatura ambiente máxima de 40°C a 1000 msnm.

PRECIOS

Ítem	Cant.	Descripción	Valor venta unitario	Valor venta total
1	1	ELECTROBOMBA 125-400-9HE-H670-AS-5R-2-80TG-125-18/397 GE	12,541.00	12,541.00
VALOR VENTA NETO			USD	12,541.00
I.G.V. 18%			USD	2,257.38
PRECIO VENTA TOTAL			USD	14,798.38

Precios: En Dólares Americanos (USD).

319-1000
www.hidrosta!.com.pe

HIDROSTA! S.A.

DESDE 1955

- LIMA fábrica, ventas, taller, Av. Portada del Sol 722 - San Juan de Lunigancha, Lima 15427, ventas@hidrosta!.com.pe
- LIMA ventas, Av. Paseo de la República 2500 - Lince, lince@hidrosta!.com.pe
- PIURA ventas, taller, Zona Industrial Mz. 229 Lote 7E, Telf: (73) 331-031, piura@hidrosta!.com.pe
- AREQUIPA ventas, taller, Av. Parra 306 - Cercado, Telf: (54) 214-090, arequipa@hidrosta!.com.pe





IMPORTACION DE EEUU A PERU

Importación Directa en Perú, IMPORTACIÓN DE USA A PERU

INTEGRASAT SOLUCIONES CENTER SRL , RUC 20455256357

BCP: 194-2622084-096, Cci: 00219400262208409896

GENPACK GF-100KW

S/44.030,00

SKU: GENPACK GF-100KW (93530)

Link: <http://www.importadorperu.com/product/edi/genpack-gf-100kw>



Product Description

Características

GRUPO ELECTROGENO ABIERTO MARCA: **GENPACK** MODELO: **GF-100KW**

Marca: **GENPACK**
Modelo: **GF-100KW**
Salida: **100KW**

item: edi39800

Precio Normal S/68988

Imagen y Beneficios





Anexo 04: Ficha técnica

DESCRIPCIÓN No.		HROS	
			
OFERTA No. JAT-0556-26 ÍTEM No. 1			
BOMBA CENTRÍFUGA TABLA TÉCNICA			
MODELO DE EQUIPO	ELECTROBOMBA 125-400-9HE-H670-A5-SR-2-80TG-125-18/397 GE		
CÓDIGO	-		
DATOS PROPORCIONADOS POR EL CUENTE		CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA BOMBA	
Líquido a bombear:	AGUA LIMPIA	Caudal (lps):	80.0
Temperatura fluido (°C):	40.0	NPSH disponible (m):	-
Gravedad específica:	1.0	A.D.T. (m):	75.0
Nivel de pH:	7.0	Porcentaje de sólidos (%):	-
Viscosidad (cP):	1.0	Tamaño sólidos (mm):	-
Temperatura ambiente (°C):	20.0	Caudal (lps):	80.0
Altitud de operación (msnm):	100	A.D.T. (m):	75.0
		Potencia absorbida (hp):	102.0
		Potencia absorbida máxima (hp):	125.0
		Velocidad de operación (rpm):	1,770
		NPSH requerido (m):	-
DATOS BOMBA		MOTOR ELÉCTRICO	
Marca:	Hidrostat	Marca:	General Electric
Tipo:	Centrífuga	Tipo:	IE2 - Alta eficiencia
Montaje:	Horizontal	Norma de construcción:	IEC
Tipo de impulsor:	Cerrado	Grado de protección:	IP55
Diámetro de impulsor:	397 mm	Aislamiento:	F
Pase de sólidos máximo:	-	Frame:	280M
Lubricación soporte:	Grease	Factor de servicio:	1.15
Diámetro de succión:	150 mm	Potencia nominal (hp):	125
Diámetro de descarga:	125 mm	Potencia corregida (hp):	-
Tipo de conexiones:	Brida	Velocidad nominal (rpm):	1,775
Tipo de bridas:	ISO/EN	Voltaje (V):	220
		Fases:	3
		Frecuencia (Hz):	60
		Tipo de arranque:	Variador de velocidad
SELLO DE LA BOMBA		SISTEMA DE TRANSMISIÓN	
Tipo de sello:	Presestope	Tipo:	Acople directo
Marca:	Hidrostat o similar	Marca:	SKF o similar
Materiales:	Fibra acrílica de teflón	Modelo:	TG 1080
MATERIALES DE FABRICACIÓN		PLACA BASE	
Ejecución metalúrgica:	SHE	Tipo:	SR-2
Caja:	Hierro fundido nodular ASTM A536-806006	Materiales:	Acero estructural A36
Impulsor:	Hierro fundido nodular ASTM A536-806006		
Bocina eje:	Acero inoxidable AISI 420		
Eje bomba:	Acero al carbono AISI 1045		
Soporte:	Hierro fundido gris ASTM A48 CL-30B		
Camiseta ⁽¹⁾ :	-		
Tapa de succión ⁽¹⁾ :	-		
⁽¹⁾ Aplicable a bombas Hidrostat con impulsor helicoidal		PRUEBAS	
		Prueba de desempeño:	No.
		Prueba hidrostática:	No.
		Certificado NPSH:	No.
		Otros:	-
OBSERVACIONES			
Embalaje caja de madera ☒			



Hoja de datos de la bomba - Bombas de aplicación general

Empresa:
Nombre:
Fecha: 10/06/2026

Cliente:
Proyecto:
Ubicación:
Nro Cotización:
Item ID / Nro TAG:
Cantidad:



Bomba:

Tamaño: 125-400
Tipo: ISO 2858
Velocidad de sync.: 1800 rpm
Diámetro: 396.1 mm
Curvas: 1-125-400-4P-FF

Dimensiones
Aspiración: 150 mm
Descarga: 125 mm

Fluido:

Nombre: Water
SG: 1
Densidad: 999 kg/m³
Viscosidad: 1.1 cP
Temperatura: 15.6 °C
Presión de vapor: 1.77 kPa a
Presión atm: 101 kPa a
Proporción de margen: 1

Criterios de búsqueda:

Caudal: 80 l/s
Altura: 75 m
Casi un fallo: ---
Altura Estática: 0 m

Límites de la bomba:

Temperatura: ---
Wkg Pressure: ---
Tamaño de la esfera: ---

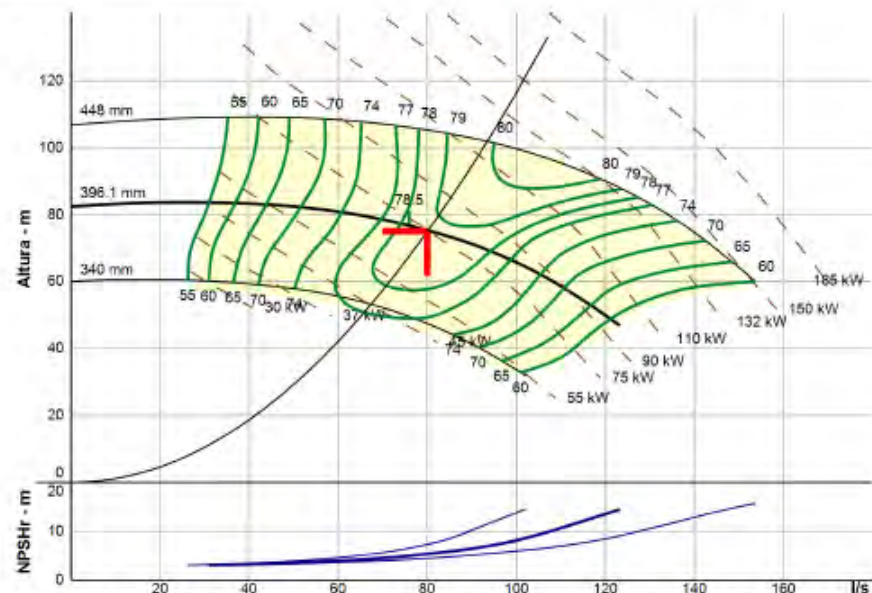
Motor:

Estándar: IEC
Caja: TEFC
Tamaño motor: 280S/M
Potencia: 110 kW
Velocidad: 1800 rpm
Criterios de medición: Potencia máxima en la curva característica

Advertencias para la selección de bombas:

None

--- Datos del punto ---	
Caudal:	80 l/s
Altura:	75 m
Rend:	78.4%
Potencia:	74.8 kW
NPSHr:	5.46 m
Velocid:	1770 rpm
--- Curva característica ---	
altura v. cerrada:	82.4 m
dP v. cerrada:	808 kPa
Caudal mínimo:	--- l/s
BEP:	78.5% @ 75.9 l/s
Potencia NOL:	97.3 kW @ 123 l/s
--- Curva máxima ---	
Potencia máxima:	151 kW @ 154 l/s

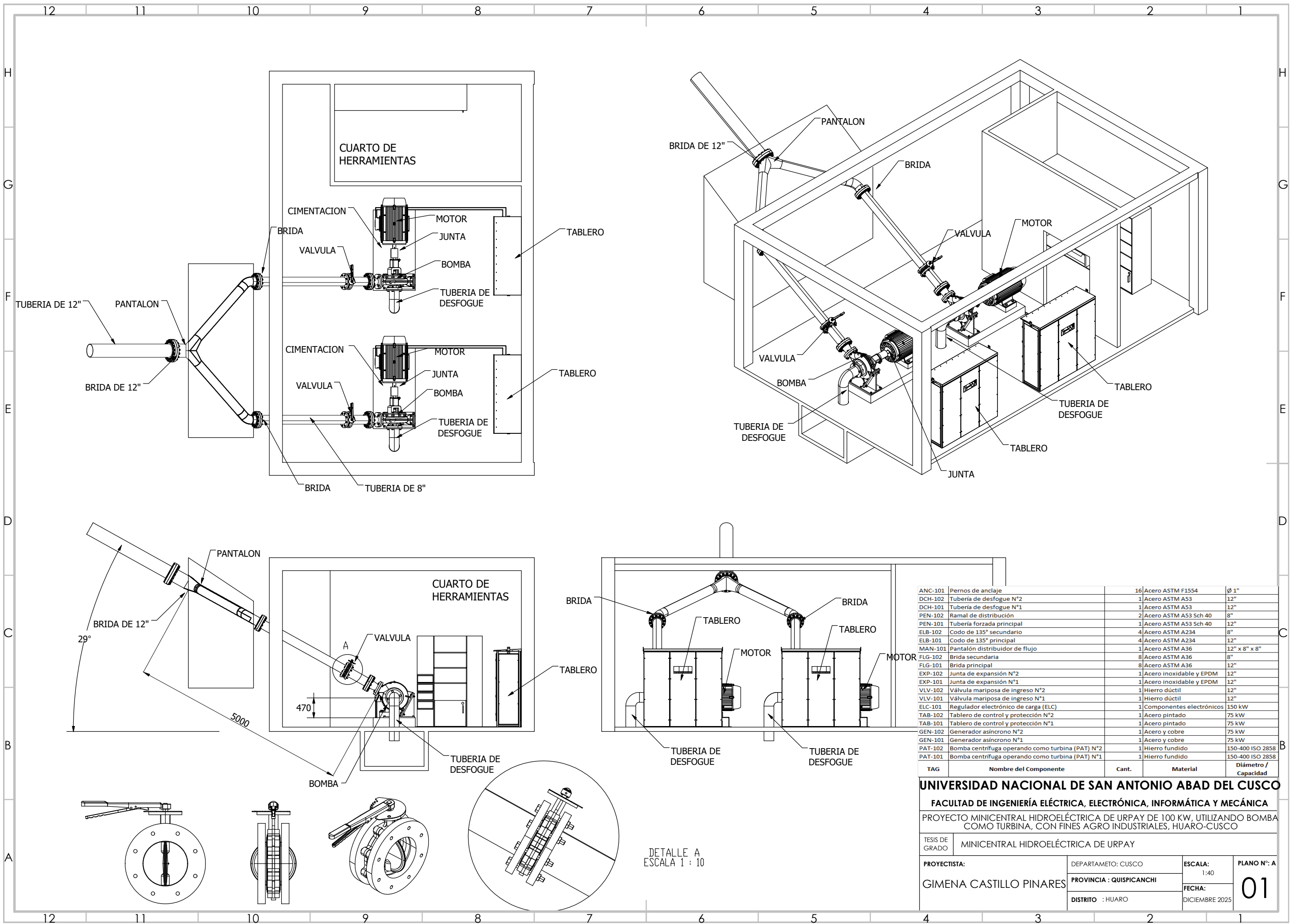


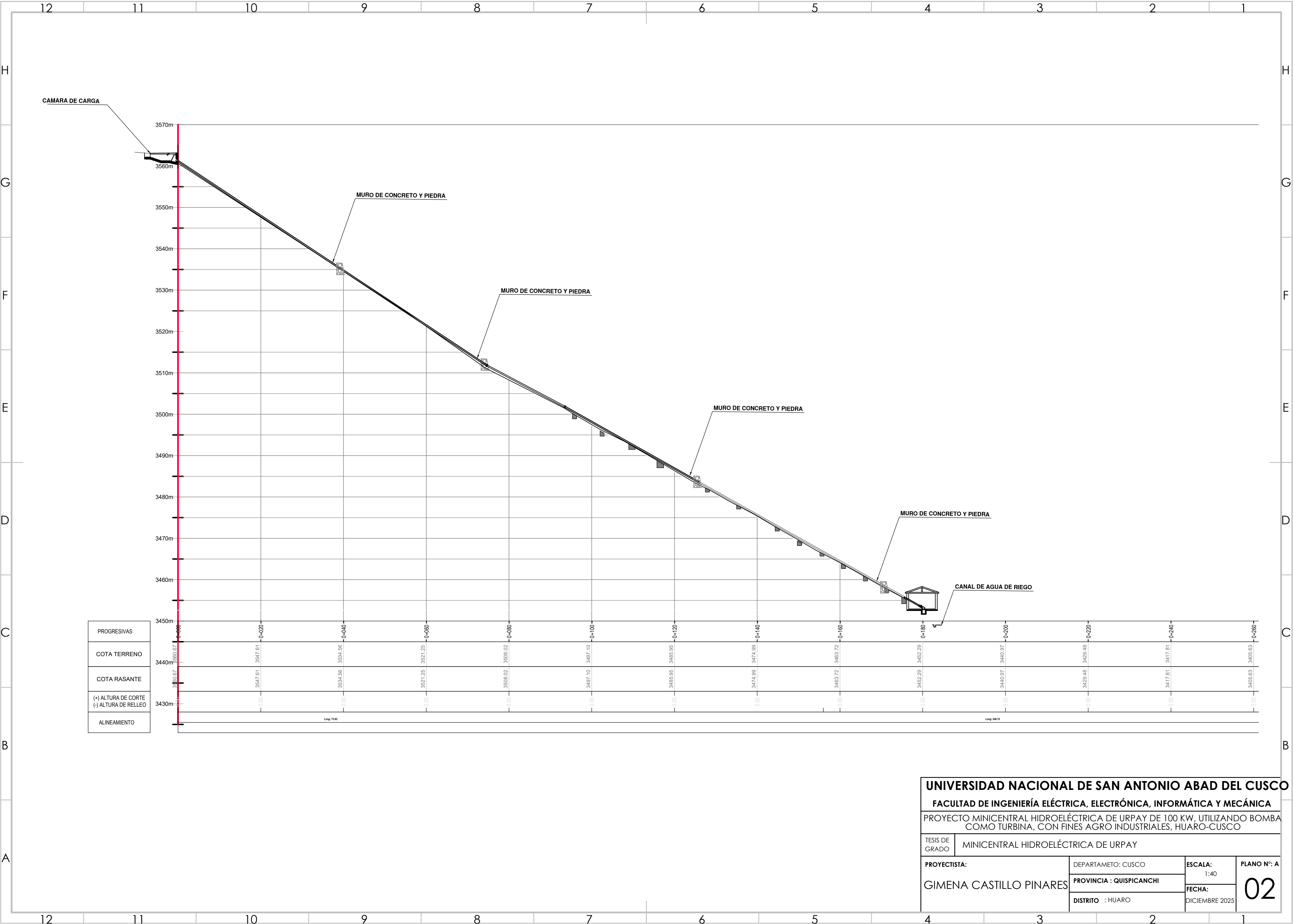
CURVAS MOSTRADAS PARA BOMBAS CON CAJA EN FIERRO FUNDIDO GRIS O NODULAR CON RECUBRIMIENTO CERAMICO. CURVAS DE ACUERDO A NORMA ISO 9906:2012 GRADO 2B.

Evaluación de rendimiento:

Caudal	Velocidad	Altura	Rendimiento	Potencia	NPSHr
l/s	rpm	m	%	kW	m
96	1770	68.1	77.6	82.5	7.4
80	1770	75	78.4	74.7	5.46
64	1770	80	75.1	66.7	4.17
48	1770	82.6	67.7	57.3	3.47
32	1770	83.6	55.9	46.8	3.09

Seleccionado del catálogo: Línea 1 - Bombas de aplicación general (60Hz), Versión 2.00





UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA Y MECÁNICA

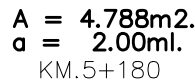
PROYECTO MINICENTRAL HIDROELÉCTRICA DE URPAY DE 100 KW, UTILIZANDO BOMBA COMO TURBINA, CON FINES AGRO INDUSTRIALES, HUARO-CUSCO

TESIS DE GRADO	MINICENTRAL HIDROELÉCTRICA DE URPAY		
PROYECTISTA:	DEPARTAMETO: CUSCO	ESCALA: 1:40	PLANO N°: A
	PROVINCIA : QUISPICANCHI	FECHA:	
	DISTRITO : HUARO	DICIEMBRE 2025	



D

- C



B

A

TESIS DE GRADO	MINICENTRAL HIDROELÉCTRICA DE URPAY
----------------	-------------------------------------

DEPARTAMENTO: CUSCO
PROVINCIA : QUISPICANCHI
DISTRITO : HUARO

ESCALA: 1:30	PLANO Nº: A
FECHA: DICIEMBRE 2025	03