

# **UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**TESIS**

**CÁLCULOS Y DIMENSIONAMIENTO PARA LA INSTALACIÓN  
DE UNA TURBINA KAPLAN EN LA PEQUEÑA CENTRAL  
HIDROELÉCTRICA DE EL HUAYCO**

PRESENTADO POR EL BACHILLER

**ADDERLY JUAN VEGA ZEGARRA**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO

AREQUIPA – PERÚ

2018

*A Dios, que sin su  
presencia no  
tendríamos nada*

*A mis padres, quienes  
estuvieron conmigo en  
todo el camino que seguí  
hasta aquí; han sido  
ejemplos de vida,  
dedicación y amor*

*A mis asesores, Ing. Edwin  
Vargas Collado e Ing.  
Manuel Callo Conto, los  
cuales han sido una guía  
para la consecución de este  
trabajo durante mis años  
académicos*

*Al Ing. Renzo Molina,  
docente de la Escuela  
Profesional de Ingeniería  
Mecánica, por su  
invaluable aporte para la  
consecución de este trabajo*

## RESUMEN

Nuestra investigación consiste en la selección, cálculo y dimensionamiento para la instalación de una turbina Kaplan en la pequeña central hidroeléctrica de El Huayco, a objeto de que genere energía eléctrica de 1MW como mínimo, sumando así todas las posibles pérdidas que se pudieran encontrar durante el proceso para poder hacer un buen dimensionamiento.

La investigación se llevó a cabo en las instalaciones de la empresa **OXYMAN COMERCIAL SAC** de la zona de El Huayco, distrito de Uchumayo; en donde se observó las condiciones en las que debe trabajar la turbina para generar energía eléctrica, haciendo un análisis sobre el diagnóstico situacional con las condiciones geográficas, hidrográficas, ambientales, infraestructura y equipo; las cuales permitirán obtener una gran viabilidad para la repotenciación de la pequeña central hidroeléctrica, que anteriormente funcionaba con la fábrica de tejidos La Unión y ahora brindará grandes beneficios a la empresa **OXYMAN COMERCIAL SAC**.

El primer capítulo, enfoca en planteamiento metodológico sobre la descripción, delimitaciones, problemas generales y específicos, hipótesis específicas, identificación y clasificación de variables e indicadores, diseño de la investigación, tipo de investigación, nivel de la investigación, método, población y muestra de la investigación, técnicas e instrumentos de la recolección de datos

El marco teórico lo ubicamos en el segundo capítulo, que comprende los antecedentes de la investigación y la base teórica

El tercer capítulo, integra la presentación, análisis e interpretación de los resultados

Finalmente, aludimos a las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

**Palabras claves: Cálculo, Dimensiones, turbina, central, hidroeléctrica.**

## ABSTRACT

Our research consists in the selection, calculation and dimensioning for the installation of a Kaplan turbine in the small central hydroelectric of El Huayco, object that generates electric power of 1 MW at a minimum, thus adding all possible losses that they could find during the process to make a good size.

The research was conducted on the premises of the company **OXYMAN COMERCIAL SAC** of El Huayco, Uchumayo district area; where was the conditions in which it must work the turbine to generate electricity, doing an analysis on the situational analysis with geographical, hydrographic and environmental conditions, infrastructure and equipment; which will allow to obtain a great viability for the repowering of small hydroelectric station, which previously worked with the Union textile mill and now will provide great benefits to the company **OXYMAN COMERCIAL SAC**.

The first chapter focuses on methodological approach on the description, delimitations, General and specific problems, specific hypotheses, identification and classification of variables and indicators, research design, type of research, level of research, method, population and sample of research, techniques and instruments of data collection.

We locate the theoretical framework in the second chapter, which includes the background of the research and theoretical base

The third chapter, integrates the presentation, analysis and interpretation of results

Finally, we refer to the conclusions and recommendations of the research.

**Keywords:** calculation, dimensions, turbine, hydro-power plant.

# INTRODUCCIÓN

Desde hace más de un siglo aproximadamente funcionó la fábrica de tejidos La Unión, ubicado en el anexo de El Huayco, distrito de Uchumayo; esta empresa hace decenas de años atrás construyó y puso en funcionamiento una pequeña central hidroeléctrica, solo para consumo propio de la fábrica. Esta pequeña central se encuentra paralizada desde hace 20 años aproximadamente. La fábrica quebró y entró en remate judicial, y fue comprado por **OXYMAN COMERCIAL SAC** quien es propietario en la actualidad.

**OXYMAN COMERCIAL SAC**, compra energía eléctrica a la SEAL, quien no le suministra la suficiente cantidad de energía eléctrica, ni puede hacerlo durante las 24 horas del día; a lo que se suma los constantes cortes y la falta de suministro energético en horas punta, lo que afecta su producción, ni permite su desarrollo o ampliación; por ello se realizaron las gestiones pertinentes para ampliar y hacer funcionar nuevamente esa pequeña central hidroeléctrica que además beneficiará a una población de 500 habitantes del pueblo tradicional de El Huayco y asentamientos humanos del sector, contribuyendo a elevar su calidad de vida.

Las características que presenta el río Chili y sus condiciones geográficas, hicieron posible la instalación de la pequeña central hidroeléctrica; por lo cual no abundamos en aspectos de topografía, clima, etc.; incidiremos solo en aspectos de caudal, flujo y altura, porque se relacionan con el funcionamiento de la turbina, este último es la parte fundamental de las hidroeléctricas.

De otro lado, existe un desconocimiento sobre qué tipo de cálculos y dimensiones debe reunir esta turbina Kaplan para que cumplan los requerimientos de funcionamiento en la “pequeña central hidroeléctrica de El Huayco”;

Nuestro objetivo es determinar matemáticamente los cálculos y dimensiones de la turbina hidroeléctrica para su repotenciación comprendiendo así:

- Tubería forzada
- Cálculo y dimensionamiento de la turbina seleccionada
- Descripción de equipos electromecánicos
- Casa de máquinas
- Turbinas hidráulicas
  - Cálculos de selección de la tubería forzada
  - Selección por altura o salto vs caudal
  - Selección por velocidad específica
  - Clasificación según el grado de reacción
- Dimensionamiento
  - Dimensionamiento de la carcasa o caracol
  - Dimensionamiento del tubo de aspiración

# ÍNDICE

DEDICATORIA .....	I
AGRADECIMIENTO.....	II
RESUMEN.....	III
INTRODUCCIÓN.....	V
ÍNDICE GENERAL .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XI
ÍNDICE DE TABLAS .....	XIII
NOMENCLATURA .....	XIV

## **CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO**

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA .....	1
1.2. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	2
1.2.1. Delimitación social .....	2
1.2.2. Delimitación temporal .....	2
1.2.3. Delimitación espacial .....	2
➤ Topografía .....	3
➤ Clima .....	3
➤ Estudio hidrológico .....	3
➤ Caudal .....	3
➤ Tránsito de avenidas .....	5
➤ Análisis de las máximas avenidas .....	6
➤ Caudal ecológico para el río Chili .....	6
➤ Accesos a la zona del proyecto .....	7
1.3. PROBLEMAS DE INVESTIGACIÓN .....	7
1.3.1. Problema general .....	7
1.3.2. Problemas específicos .....	8
1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	8
1.4.1. Objetivo general .....	8
1.4.2. Objetivos específicos .....	8
1.5. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN .....	9
1.5.1. Hipótesis general .....	9

1.5.2. Hipótesis específicas	9
1.5.3. Identificación y clasificación de variables e indicadores	9
1.6. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	10
1.6.1. Tipo de investigación	10
1.6.2. Nivel de investigación	11
1.6.3. Método	11
1.7. POBLACIÓN Y MUESTRA DE LA INVESTIGACIÓN	11
1.7.1. Población	11
1.7.2. Muestra	12
1.8. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE LA RECOLECCIÓN DE DATOS	12
1.8.1. Técnicas	12
1.8.2. Instrumentos	12
1.9. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN	12
1.9.1. Justificación teórica	12
1.9.2. Justificación práctica	13
1.9.3. Justificación social	13
1.9.4. Justificación legal	14

## **CAPÍTULO II : MARCO TEÓRICO**

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	15
2.1.1. Estudios previos	15
2.1.2. Tesis nacionales	16
2.1.3. Tesis internacionales	17
2.2. BASE TEÓRICA	18
2.2.1. Pequeñas centrales hidroeléctricas	18
2.2.2. Casa de máquinas	19
2.2.3. Turbinas hidráulicas	22
2.2.3.1. Tipos y configuraciones	23
A. TURBINAS DE ACCIÓN	23
TURBINA PELTON	23
TURBINA TURGO	26

TURBINA DE FLUJO CRUZADO .....	27
B. TURBINAS DE REACCIÓN .....	29
TURBINA FRANCIS .....	29
TURBINAS KAPLAN Y DE HÉLICE... .....	33
2.2.3.2 Partes de una turbina Kaplan .....	36
2.2.4. Tubería forzada .....	38
2.2.4.1. Accesorios de la tubería forzada .....	39
2.2.4.2. Válvulas. ....	39
2.2.5. Juntas de dilatación .....	40
2.2.6. Alturas de salto neto .....	40
2.2.7. Cálculo de la altura aprovechable .....	41
2.2.8. Caída neta .....	41
2.2.9. La velocidad específica de una turbina .....	41
2.2.10. Velocidad de embalamiento .....	41
2.2.11. Tubo de aspiración .....	41
2.2.12. Cavitación .....	42

## **CAPÍTULO III : PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E**

### **INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

3.1. DATOS INICIALES .....	43
3.2. CÁLCULOS DE SELECCIÓN DE LA TUBERÍA FORZADA .....	44
3.2.1. Cálculo del diámetro... .....	44
3.2.2. Material utilizado .....	46
3.2.3. Cálculo del espesor de la tubería .....	48
3.2.4. Cálculo - pérdidas por válvulas .....	48
3.2.5. Peso .....	49
3.2.6. Longitud .....	49
3.2.7. Cálculos en juntas de dilatación .....	50
3.2.8. Cálculo de pérdidas .....	50
3.2.9. El golpe de ariete .....	54
3.3. PARÁMETROS PARA LA SELECCIÓN DE UNA TURBINA .....	58

3.3.1. Selección por altura o salto neto .....	58
3.3.2. Selección por altura o salto vs caudal .....	59
3.3.3. Selección por velocidad específica .....	60
3.3.4. Clasificación según el grado de reacción .....	61
3.4. CÁLCULOS -TURBINA (PARÁMETROS ESTABLECIDOS PARA UNA TURBINA TIPO KAPLAN) .....	63
3.4.1. Formas de trabajo de una Turbina Kaplan .....	64
3.4.2. Cálculo de la potencia de la turbina .....	65
3.4.3. Cálculo para hallar la velocidad específica de una turbina .....	66
3.4.4. Curvas características .....	68
3.4.5. Dimensionamiento .....	70
3.4.5.1. Dimensionamiento de la carcasa o caracol .....	74
3.4.5.2. Dimensionamiento del tubo de aspiración .....	78
3.4.6. Distribuidor Fink .....	80
a) Distribuidor cerrado y abierto .....	81
3.4.7. Multiplicadores de velocidad .....	83
3.4.8. Selección de la velocidad de embalamiento .....	85
3.4.9. Rendimiento de la turbina .....	86
3.4.10. Cálculos para hallar la cavitación.....	87
3.4.11. Control de la turbina .....	91
a) Reguladores de velocidad .....	92
b) Características del gobernador de velocidad .....	96
3.4.12. El caudal ecológico .....	97
3.4.13. Marco legal para el uso del caudal ecológico .....	97
a) Análisis .....	97
b) Metodología en discusión por el ANA .....	98
3.5. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS EXTERIOR –TURBINA .....	99
3.5.1. Generador .....	99
3.5.1.1. Generador asíncrono.....	100
3.5.2. Equipos de sincronización y protección eléctrica .....	100
3.5.3. Telecontrol .....	104
A. EL TABLERO DE CONTROL .....	107
3.5.4. Transformador .....	110
3.5.5. subestación exterior .....	111

3.6. EVALUACIÓN ECONÓMICA .....	112
<b>CONCLUSIONES</b> .....	113
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	114
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	115
<b>ANEXOS</b>	
1. Propiedades físicas del agua .....	117
2. Registros históricos de las estaciones .....	118
3. Cuadro de duración de potencias y energías .....	120
4. Cotizaciones .....	121
5. Planos .....	123
6. Software; simulación y dibujo .....	124

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema de sitios	5
Figura 1.2. Vista esquemática de una central de baja altura de salto.	20
Figure 1.2. Vista esquemática de una central – Saltos medios y altos	21
Figura 1.3. Perspectiva de una mini-central típica	22
Figura 1.4. Sección transversal de una tobera con deflector	24
Figura 1.5. Vista de una turbina Pelton de dos toberas	25
Figura 1.6. Turbina Pelton vertical de cuatro toberas	25
Figura 1.7. Incidencia del chorro en la turbina Pelton	26
Figura 1.8. Esquema de una turbina Turgo	27
Figura 1.9. Esquema de una turbina de flujo transversal	28
Figura 1.10. Turbina Francis de eje horizontal	29
Figura 1.11. Esquema de funcionamiento de los alabes directores	30
Figura 1.12. Accionamiento del distribuidor	31
Figura 1.13. Rodete de una turbina Francis de eje horizontal	31
Figura 1.14. Vista de una turbina Francis	31
Figura 1.15. Energía cinética a la salida del rotor	33
Figura 1.16. Turbina Kaplan	34
Figura 1.17. Esquema de una Kaplan vertical de doble regulación	35
Figura 1.18. Kaplan de doble regulación	35
Figura 1.19. Alabes del distribuidor de la turbina Kaplan 3D	36
Figura 1.20. Vista de una tubería forzada instalada	38
Figura 2.1. Tubería forzada	44
Figura 2.2. Pérdida de carga por rejilla	53
Figura 2.3. Altura de presión en el rodete	62
Figura 2.4. Triángulo de velocidades	63
Figura 2.5. Perfil de las palas	63
Figura 2.6. Turbina Kaplan de doble regulación	64
Figura 2.7. Turbina Kaplan en proyección	64
Figura 2.8. Forma de trabajo de la turbina Kaplan	64
Figura 2.9. Curva de potencia-velocidad	68
Figura 2.10. Curva de caudal-velocidad	69
Figura 2.11. Ejemplo de curvas de nivel	69

Figura 2.12. Curvas colina de la turbina Kaplan	70
Figura 2.13. Medidas en el rodete	70
Figura 2.14. Dimensiones del rodete	74
Figura 2.15. Dimensiones de la carcasa	76
Figura 2.16. Dimensiones del difusor	78
Figura 2.17. Turbina Kaplan dimensionada: turbina 3D	79
Figura 2.18. Detalle del distribuidor Fink	80
Figura 2.19. Funcionamiento del distribuidor Fink	81
Figura 2.20. Distribuidor Fink - 3D	82
Figura 2.21. Distribuidor Fink abierto	83
Figura 2.22. Central hidráulica para el servomotor	94
Figura 2.23. Regulador de bolas y servomotor	95
Figura 2.24. Exterior de una turbina Kaplan	99
Figura 2.25. Turbina Kaplan con respecto al generador	100
Figura 2.26. Esquema unifilar	101
Figura 2.27. Medida de niveles del agua	104
Figura 2.28. Tablero de telemetría	106
Figura 2.29. Tablero de control	109
Figura 2.30. Transformador	110
Figura 2.31. Subestación	111

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. Clasificación de centrales hidroeléctricas según la OLADE	18
TABLA 2. Clasificación de centrales hidroeléctricas según caída	19
TABLA 3. Altura de trabajo de las turbinas	40
TABLA 4. Coeficiente de pérdidas por válvula	48
TABLA 5. Material del tubo	51
TABLA 6. Horquilla de salto en metros	58
TABLA 7. Caudal vs. altura del salto	59
TABLA 8. Selección de turbina por velocidad específica	60
TABLA 9. Rango de velocidades específicas del generador para cada tipo de turbina	61
TABLA 10. Correlación entre la altura de salto neto $H_n$ y velocidad específica $H_{qe}$	67
TABLA 11. Velocidad específica para turbinas tipo helicoidal	72
TABLA 12. Relación entre velocidad de rotación y de embalamiento	94
TABLA 13. Rendimiento de la turbina	95

## NOMENCLATURA

<b>A</b>	: Altitud
<b>D</b>	: Diámetro
<b>DFC</b>	: Dinámica de Fluidos
<b>H<sub>n</sub></b>	: Altura Neta
<b>h<sub>s</sub></b>	: Altura de Succión [m] Altura neta
<b>n</b>	: Velocidad de giro
<b>Nde</b>	: Turbina Francis
<b>p</b>	: Presión estática
<b>Q</b>	: Caudal suministrado a la Turbina
<b>Q<sub>inst</sub></b>	: Caudal instalado en la central hidroeléctrica
<b>Q<sub>n</sub></b>	: Caudal nominal
<b>Q<sub>SIM</sub></b>	: Caudal relacionado con las simulaciones
<b>s.m.</b>	: Sistema Métrico
<b>TH</b>	: Turbina Hidráulica
<b>U</b>	: Velocidad Circunferencial
<b>V</b>	: Velocidad Absoluta
<b>Vr</b>	: Velocidad Relativa
<b>α<sub>1</sub></b>	: Ángulo de entrada del flujo
<b>η</b>	: Eficiencia Global
<b>η<sub>H</sub></b>	: Eficiencia Hidráulica
<b>η<sub>m</sub></b>	: Eficiencia Mecánica
<b>η<sub>v</sub></b>	: Eficiencia Volumétrica
<b>η<sub>vQ</sub></b>	: Densidad del agua 998 [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>σ<sub>cr1</sub></b>	: Coeficiente crítico de cavitación de la turbina
<b>σ<sub>INS</sub></b>	: Coeficiente de cavitación de la instalación

# CAPÍTULO I

## PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

### 1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

La Región de Arequipa se ha convertido en uno de los ejes importantes dentro de la economía del sur del país, donde las empresas de servicio y producción hacen uso de manera fluctuante de la energía eléctrica, por el cual está categorizada como energía industrial; los polos donde se encuentran ejecutando dichas empresas están ubicadas en el parque industrial, en la zona de Apima y en Rio Seco, no dejando de lado, la existencia de otras fábricas en otros lugares como en la vía de Evitamiento y la variante de Uchumayo, a todas las cuales se les brinda un consumo de energía en forma limitada.

El principal problema de la empresa **OXYMAN COMERCIAL SAC** es la cantidad de energía eléctrica que le suministra la concesionaria (SEAL), necesita de 1MW, pero recibe solo 500 kW Limitando así la producción, por ende, el desarrollo.

Otro problema es que el suministro de energía solo está permitido desde las 23 horas hasta las 17 horas del día siguiente; limitando el uso

diario de consumo de energía eléctrica , reduciendo la producción en 1/3 de su capacidad, reflejándose en una gran pérdida monetaria anual para la empresa.

## **1.2. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.2.1. Delimitación social**

Esta investigación se efectuó tras un estudio de pre-factibilidad entre el costo de producción y costo de kW comprado a SEAL, entidad encargada del suministro eléctrico. Haciendo el balance se tuvo como resultado un producto encarecido que podría ser disminuido con la puesta en funcionamiento de la pequeña central hidroeléctrica en beneficio de la empresa antes mencionada.

### **1.2.2. Delimitación temporal**

La investigación se desarrolló entre los meses de agosto de 2014 hasta junio, 2015 (parte civil) y noviembre, 2015 a febrero, 2016 (parte mecánica) para su posterior aprobación ante el Ministerio de Energía y Minas, estimando un plazo de ejecución de 2 años aproximadamente.

### **1.2.3. Delimitación espacial**

El lugar del proyecto se ubica al sur de la ciudad de Arequipa a unos 15 Km de distancia aproximadamente desde la plaza principal de la ciudad de Arequipa.

#### **GEOGRÁFICAMENTE SE UBICA EN:**

<b>REGIÓN</b>	: Arequipa
<b>DEPARTAMENTO</b>	: Arequipa
<b>PROVINCIA</b>	: Arequipa
<b>DISTRITO</b>	: Uchumayo
<b>ANEXO</b>	: El Huayco
<b>ALTITUD</b>	: 2 020.00 m.s.n.m.

➤ **Topografía**

La superficie de la zona estudiada presenta una topografía accidentada, está en las faldas de los cerros aledaños a orillas del río Chili, con ligeras ondulaciones, presentando también pequeñas depresiones físicas. Se hizo el levantamiento topográfico a detalle con datos del Instituto Geográfico Nacional.

➤ **Clima**

En el distrito de Uchumayo predomina el clima desértico subtropical, muy caluroso; la mayor parte del año hay ausencia total de lluvias, excepto en los meses de febrero y marzo. El promedio anual de temperatura es de 23°C, mientras que la temperatura media más baja en el periodo más frío es de 8°C.

➤ **Estudio hidrológico**

Igualmente se hizo los estudios hidrológicos pertinentes, tales como determinación de caudales máximos y mínimos, con datos proporcionados por SENAMHI.<sup>1</sup> En base a estos cálculos se ha diseñado las obras civiles y electromecánicas (ver anexo 2).

➤ **Caudal**

**Caudal de diseño**

El río Chili es regulado por sistema de siete represas. En consecuencia, así siempre será el comportamiento futuro de los recursos hídricos.

La represa el Pañe está ubicado sobre los 4 585 m.s.n.m, en el extremo norte del área; así mismo el canal Pañe Sumbay realiza su recorrido entre los 4 585 m.s.n.m. , y 4 430 m.s.n.m. de norte a sur .

---

<sup>1</sup> SENAMHI: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - Registros Históricos de las Estaciones

El embalse Dique de los Españoles se localiza aproximadamente a 7 km antes del término del canal pañe-Sumbay, sobre los 4 432 m.s.n.m. A continuación tenemos el embalse La represa del Fraile, ubicado al extremo sur en la cota 4 000 m.s.n.m. y al sur-oeste finalmente el embalse Aguada blanca sobre los 3 660 m.s.n.m.

Las otras represas como Pillones, Chalhuanca y Bamputañe son operadas por Egasa, primordialmente con fines de generación de energía hidroeléctrica. Después de turbinar sus aguas en especial en Central hidroeléctrica de Charcani V, entrega sus aguas para fines del riego al río Chili.

Debajo de la central hidroeléctrica de Charcani V, se encuentra la primera toma agrícola de la campiña de Arequipa que también es usada para el abastecimiento de la población de la ciudad de Arequipa; aguas abajo, encontramos varias tomas agrícolas en ambos márgenes del río Chili y dentro del radio urbano de la ciudad de Arequipa. Aproximadamente a 12 km, fuera de la ciudad, a la altura de Congata se encuentra la toma de la Sociedad Minera Cerro Verde; a ésta última le sigue la toma de la pequeña central hidroeléctrica de El Huayco, cuyas aguas son conducidas por un canal de aproximadamente 600m, que después de turbinar, nuevamente vuelve a entregar el agua al río Chili.

A efectos de maximizar la cantidad de energía a producirse con un buen factor de planta y sin elevar sensiblemente los costos por equipos sobredimensionados, se ha escogido un caudal de  $7.35\text{m}^3/\text{seg}$ , con una persistencia de 78% <sup>(2)</sup>, lo que significa un mínimo de 255 días al año de generación a plena potencia.

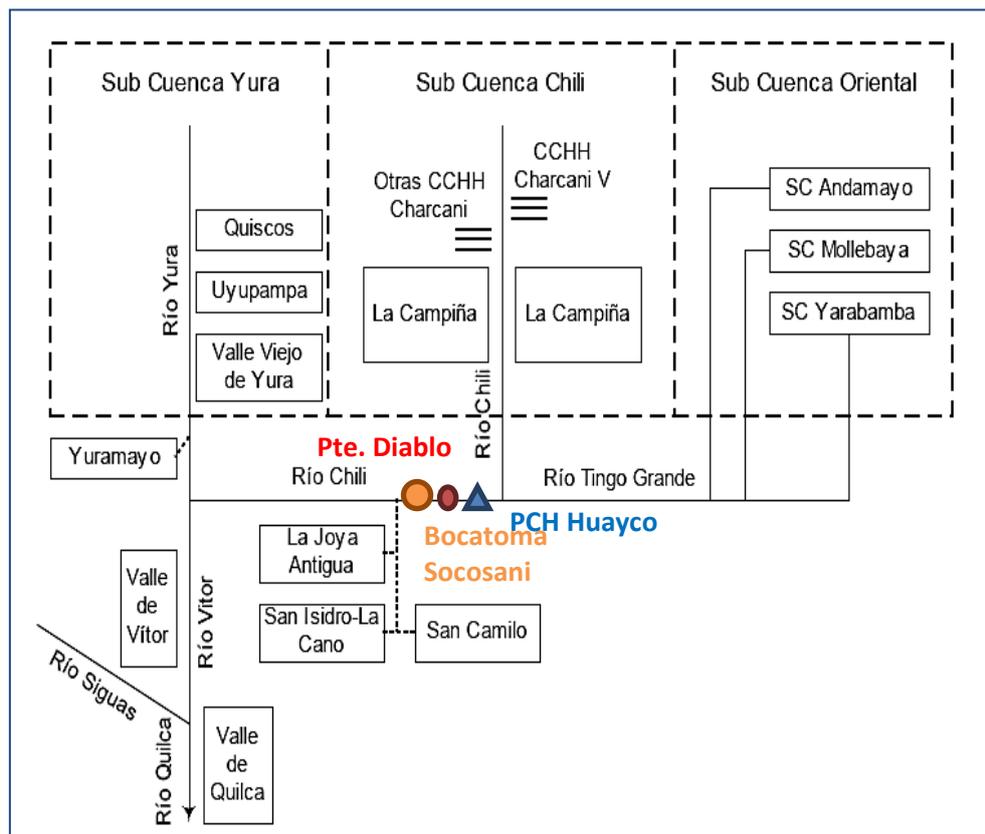
Más abajo se encuentra la toma de Socosani a unos 22km de la ciudad de Arequipa, la cual abastece a la irrigación de la

---

<sup>2</sup> Ver Anexo 2

pampa de La Joya (irrigaciones de la Joya antigua y la Joya nueva, conformado por San Isidro, San Camilo y La Cano). Aguas abajo, el río Chili se une con el río Yura, para formar el río Vitor, el cual luego de su confluencia con el río Sigwas, se forma el río Quilca que desemboca en el Océano Pacífico. La cuenca del río Chili tiene un área de 3 800 km<sup>2</sup>.

**Figura 1.1. Esquema de sitios**



**Fuente: Autodema, Esquema de sitios de demanda de la cuenca.**

➤ **Tránsito de avenidas**

Es la simulación de los lugares inundables cuando ocurren tormentas de grandes intensidades, para lo cual es necesario conocer la topografía del lugar y se puede desarrollar a través de la fórmula de Manning.<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Es una evolución de la [fórmula de Chézy](#) para el cálculo de la velocidad del [agua](#) en [canales abiertos](#) y tuberías

En el caso de la PCH, ubicada en la Cuenca Regulada del Río Chili éste cálculo de transito de avenidas se ha efectuado para la bocatoma, que por ser el elemento más expuesto es inundable y se ha diseñado para una avenida máxima de **423.67 m<sup>3</sup>/s.**<sup>4</sup>

Otro lugar también afectable por avenidas es la Casa de Máquinas, para lo cual se tiene diseñada una defensa ribereña.

A lo largo del canal de aducción, los tramos sujetos a derrumbes por lluvias inusuales u otros, son cálculos que estarán dentro de la ingeniería de detalle (parte civil).

➤ **Análisis de las máximas avenidas**

Por el sistema de los siete embalses y canales de interconexión construidos, que conforman la cuenca regulada del río Chili, las máximas avenidas que se puedan producir en la Bocatoma de la PCH , están sujetas a que rebosen estos reservorios, especialmente el de Aguada Blanca.

De la relación de aforos de la estación meteorológica, denominada Puente del Diablo de SENAMHI, se tiene el caudal máximo aforado en el periodo octubre, 2003 a marzo, 2011: 204.00m<sup>3</sup>/seg (**Anexo 2: tabla A-1**).

Este valor aforado en la Estación Puente del Diablo, será usado para el dimensionamiento de la bocatoma de la PCH, con factor 1.3; es decir, se proyectará la bocatoma para una avenida de 265m<sup>3</sup>/seg.

➤ **Caudal ecológico para el río Chili**

La expresión **caudal ecológico**, referido a un río o a cualquier otro cauce de agua o corriente, es una expresión que

---

<sup>4</sup> Caudales máximos ' ver Anexo 2

puede definirse como el agua necesaria para preservar los valores ecológicos en el cauce del mismo, como:

- Los hábitats naturales que cobijan una riqueza de flora y fauna, las funciones ambientales como dilución de polutantes <sup>5</sup> o contaminantes,
- Amortiguación de los extremos climatológicos e hidrológicos
- Preservación del paisaje

➤ **Accesos a la zona del proyecto**

Para llegar a la zona del proyecto desde el centro de la ciudad, es siguiendo por la avenida Parra hasta llegar al Balneario de Tingo. El río Chili se cruza por el puente Tingo, continuamos por la avenida Arancota hasta el distrito de Tiabaya y se toma la carretera al pueblo joven Cerro Verde; de éste, se desvía hacia Arancota, después de recorrer unos 600 metros se continúa hasta llegar al pueblo tradicional de El Huayco. Allí a la entrada del pueblo se encuentra la exfábrica de tejidos La Unión, lugar del proyecto.

### **1.3. PROBLEMAS DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **1.3.1. Problema general**

¿Cuáles son los cálculos y el dimensionamiento que debería tener **la turbina Kaplan** para la Pequeña Central Hidroeléctrica de El Huayco, para proveer un mínimo de 1MW de energía eléctrica, que permita poner en funcionamiento la maquinaria y su ampliación de la empresa **OXYMAN COMERCIAL SAC?**

---

<sup>5</sup> Polutantes : Es una sustancia que causa contaminación y/o por definición puede causar algún efecto peligroso

### 1.3.2. Problemas específicos

¿Es adecuada la turbina Kaplan para que trabaje a caudales mínimos y máximos y en las condiciones físicas de la Pequeña Central Hidroeléctrica?

¿Qué cálculos y dimensionamiento son necesarios para el funcionamiento de la turbina Kaplan, considerando las condiciones topográficas e hidrográficas de la Pequeña Central Hidroeléctrica en el anexo de El Huayco?

¿Cuáles son los costos y beneficios económicos que le representaría a la empresa **OXYMAN COMERCIAL SAC** la instalación y puesta en funcionamiento de la Pequeña Central Hidroeléctrica en el anexo de El Huayco?

## 1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.4.1. Objetivo general

Determinar los cálculos y el dimensionamiento que debería tener la turbina Kaplan para la Pequeña Central Hidroeléctrica de El Huayco, para proveer un mínimo de 1 MW de energía eléctrica, que permita poner en funcionamiento la maquinaria y su ampliación de la empresa **OXYMAN COMERCIAL SAC**.

### 1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar si la turbina Kaplan es la adecuada para que trabaje a caudales mínimos y máximos y en las condiciones físicas de la Pequeña Central Hidroeléctrica.
- Efectuar los cálculos y dimensionamientos, que son necesarios para el funcionamiento de la turbina Kaplan, considerando las condiciones topográficas e hidrográficas de la Pequeña Central Hidroeléctrica en el anexo de El Huayco.

- Evaluar los costos y beneficios económicos que le representaría a la empresa **OXYMAN COMERCIAL SAC** la instalación y puesta en funcionamiento de la Pequeña Central Hidroeléctrica en el anexo de El Huayco.

## **1.5. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.5.1. Hipótesis general**

Con la precisión de los cálculos y el dimensionamiento del estudio de la turbina tipo Kaplan en la Pequeña Central Hidroeléctrica de El Huayco, es probable que genere 1000 kW de energía eléctrica, lo cual permitiría poner en funcionamiento la maquinaria y equipos de la *EMPRESA OXYMAN COMERCIAL SAC* y la ampliación para su otra empresa *ROCATECH SAC*. Superaría sus problemas de insuficiencia, horario y cortes de energía; representándole una inversión no muy costosa y recuperable con el incremento de la producción.

### **1.5.2. Hipótesis específicos**

Condiciones de viabilidad en cuanto a rendimiento, generación de energía y durabilidad de la turbina Kaplan, frente a otras que nos presenta la tecnología hidroeléctrica.

Aumento de la producción de la empresa, triplicando así su producción y superar los problemas que le representa el comprar energía eléctrica a la SEAL.

Cumplimiento de dispositivos legales y beneficio a la población aledaña. Los cálculos y el dimensionamiento llevados a cabo para su estudio de factibilidad de la turbina Kaplan hará posible que trabaje a caudales mínimos y máximos y en las condiciones físicas de la Pequeña Central Hidroeléctrica

### **1.5.3. Identificación y clasificación de las variables e indicadores**

#### **Variable independiente**

Cálculos y dimensionamiento

#### **Variable dependiente**

Turbina Kaplan.

**Cuadro 1. Operación y matización de la hipótesis, variables e indicadores**

Hipótesis	Variables	Indicadores
<p>Con la precisión de los cálculos y el dimensionamiento del estudio de la turbina tipo Kaplan, en la pequeña central hidroeléctrica de El Huayco, es probable que genere 1000 kW de energía eléctrica, lo cual permitiría poner en funcionamiento la maquinaria y equipos de la empresa <b>OXYMAN COMERCIAL SAC</b> y la ampliación para su otra empresa <b>ROCATECH SAC</b>, superando los problemas de insuficiencia, horario y cortes de energía, representándole una inversión no muy costosa y recuperable con el incremento de la producción.</p>	<p>Variable independiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Cálculos y dimensionamiento</li> </ul> <p>Variable dependiente:</p> <p>La turbina Kaplan.</p>	<p>Tipo de cálculo</p> <p>Tipo de dimensionamiento</p> <p>Fórmulas</p> <p>Marca</p> <p>Capacidad</p>

## 1.6. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.6.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación es de campo debido a que se efectuó una observación directa sobre la ubicación espacial donde se desarrollará las acciones operativas de la Pequeña Central Hidroeléctrica; recopilando información documental y oral sobre su funcionamiento y el proyecto de repotenciación y ampliación actual por sus nuevos dueños de la empresa **OXYMAN COMERCIAL SAC**.

### 1.6.2. Nivel de la investigación

El nivel de la investigación es cuantitativo, con carácter descriptivo – explicativo. Es decir, se detallará el cálculo del diseño y selección de la turbina en la Pequeña Central Hidroeléctrica y la explicación de su diseño.

### 1.6.3. Método

La elaboración de este estudio de investigación se basó en la recopilación de información obtenidas en campo, usando las medidas de la antigua central hidroeléctrica, y obteniendo nuevas medidas geográficas para su posterior ampliación y mejora. Estos datos fueron brindados por el área de ingeniería, encargada de ver la geografía y el tipo de suelo; adicionalmente, las fuentes secundarias se obtuvieron en internet. Se utilizó como la información primaria para de los diferentes tipos de cálculo los datos han sido brindados por las entidades correspondientes (ANA)<sup>6</sup> y (AAA)<sup>7</sup>, quienes midieron el caudal de la afluencia del río Chili, basándonos en los parámetros que tienen para el uso del agua, determinamos si el caudal que usa está dentro de dicha norma o contradice con la ley.

## 1.7. POBLACIÓN Y MUESTRA DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.7.1. Población

En el presente trabajo, la población está constituida por el personal de la empresa **OXYMAN COMERCIAL SAC. y ROCATECH SAC.**, tanto gerencial o dueños como los trabajadores de las dos empresas que conforman dicho consorcio; además, el promedio de 500 habitantes que viven en la actualidad en el anexo de El Huayco, distrito de Uchumayo a quienes también beneficiará la repotenciación de la Pequeña Central Hidroeléctrica.

---

<sup>6</sup> AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA

<sup>7</sup> AUTORIDAD AUTÓNOMA DE AGUA

### **1.7.2. Muestra**

La muestra está constituida por los cálculos que se ha tenido que hacer para el correcto funcionamiento de la turbina: cálculos para seleccionar la turbina, determinar el diámetro y espesor de la tubería forzada; cálculo de las válvulas, potencia y velocidades de la turbina; cálculos para el dimensionamiento del diámetro de la turbina y dimensionamiento del tubo de aspiración, etc. que tienen que concordar con el tipo de turbina, sus componentes y equipos y las condiciones topográficas e hidrológicas de la zona; considerando que ello no se obtiene con la aplicación de encuestas o recolección de opiniones.

## **1.8. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE LA RECOLECCIÓN DE DATOS**

### **1.8.1. Técnicas**

- La observación directa
- La observación documental

### **1.8.2. Instrumentos**

- Proyecto de ampliación de la Pequeña Central Hidroeléctrica por la empresa **OXYMAN COMERCIAL SAC**.
- Informe del SENAMHI sobre descargas medias del río Chili en la zona de El Huayco
- Presupuesto comercial de la turbina Kaplan y sus componentes
- Normatividad legal y Tupa del Ministerio de Energía y Minas.
- Datos otorgados por la parte civil del proyecto, indicando caudal, altura y salto neto

## **1.9. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.9.1. Justificación teórica**

El proyecto de la empresa **OXYMAN COMERCIAL SAC** de reflotamiento, repotenciación y ampliación de la Pequeña Central Hidroeléctrica existente en El Huayco, requiere como mínimo la generación de 1MW de potencia y para la producción de dicha

energía, se necesita definir el tipo de turbina a instalar, conjuntamente con sus componentes y equipos, en base a cálculos y dimensionamiento de los mismos, que aseguren su rendimiento y durabilidad, sin que represente una inversión excesiva.

### **1.9.2. Justificación práctica**

El presente proyecto es técnicamente adecuado porque se va a utilizar una minicentral que existió y funcionó anteriormente teniendo registros históricos de operación, no necesitando estudios de factibilidad, sino de mejoramiento o repotenciación; siendo el trámite ante el Ministerio de Energía y Minas más sencillo y rápido, ello también permitirá dar solución al problema principal de insuficiencia de energía hidroeléctrica, que es necesario para los propósitos de producción y ampliación de la empresa **OXYMAN COMERCIAL SAC**. Asimismo, le permitirá un ahorro económico por el no pago ni compra de energía a la SEAL.

De otro lado, es importante esta investigación porque pretende aprovechar el recurso hídrico para la generación de la energía eléctrica, así abaratar los costos económicos de consumo, tanto en la actividad doméstica como industrial.

### **1.9.3. Justificación social**

Siendo esta investigación una iniciativa particular con capitales privados para reflotar y repotenciar la Pequeña Central Hidroeléctrica, va a conllevar la generación de puestos de trabajo en el sector y en nuestra ciudad; asimismo, hay un aprovechamiento de los recursos hídricos con los cuales se va a mejorar la productividad de la empresa **OXYMAN COMERCIAL SAC**. Finalmente, va a representar un beneficio para la población de El Huayco a quien se le va a dotar de energía eléctrica y su población ya no sufriría el riesgo de los cortes continuos de la electricidad.

#### **1.9.4. Justificación legal**

Nuestro estudio se encuentra respaldado por dispositivos legales:

- Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos, Decreto Supremo No. 001 – 2010 - AG
- Decreto Legislativo No. 1002 y el Reglamento de la generación de electricidad con energías renovables
- Decreto Supremo No. 050-2008-EM
- **Ley de concesiones eléctricas D.L. 25844**
- **Arts. 63º y 71º de la Constitución**

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN**

##### **2.1.1. Estudios previos para la elaboración del proyecto**

Por las propiedades generales de los ríos de la sierra, torrentosos y con pendientes marcadas, es posible aprovechar estas características combinadas con sistemas de flujo de agua regulado para la generación de potencias significativas de energía eléctrica.

La combinación de estas características de flujo regulado mínimo, constante y rápida generación de alturas de caída, hace muy atractiva la instalación de una central de generación hidroeléctrica; con estas particularidades en su caudal de alimentación, permite tener la fuerza garantizada de una potencia mínima durante todo el año y posibilita un incremento substancial de potencia generada durante los meses de crecida, a lo que se deberá considerar en el dimensionamiento de las obras civiles y electromecánicas de la Central.

Esta cuenca está regulada por el Sistema de Represas existente en la Región Arequipa: El Frayle, Aguada Blanca, El Pañe, dique Los Españoles, Bamputañe, Pillones y Chalhuanca

El Sistema de Riego Regulado del Chili, así conformado, posibilita que el caudal de este río, históricamente tenga en circunstancias normales, un aforo mínimo garantizado – incluso en las épocas de estiaje y años con poca precipitación pluvial – lo que crea una condición invalorable para asegurar la generación de un mínimo de potencia eléctrica constante.

Adicionalmente, el alto crecimiento de la ciudad de Arequipa crea exigencia de mayor cantidad de agua potable, más tierras de cultivo y mayor consumo de energía eléctrica que obligan que en la Región se materialice un programa de construcción de nuevas represas de ciertas capacidades las cuales han de disminuir drásticamente las pérdidas de agua por filtraciones en las estructuras del sistema de riego del río Chili, lo que hace que, a futuro cercano, se deba por lo menos mantener el caudal diario mínimo disponible en la zona del proyecto, con lo que se garantiza la generación de energía calculada.

### **2.1.2. Tesis nacionales**

*Universidad Católica del Perú*

*DISEÑO DE UN GRUPO HIDROENERGÉTICO MICHELL-BANKI DE 120 kW Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico.<sup>8</sup>*

El trabajo busca ser una buena alternativa en la instalación de grupos hidroenergéticos en las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas que se construyen en el Perú y de este modo cubrir el déficit de electrificación en zonas rurales. Para ello, se ha planteado el diseño de un grupo hidroenergético que opere con una turbina estandarizada Michell- Banki debido a que esta turbina tiene una buena eficiencia dentro de un amplio rango de caudal, bajo costo y es de fácil fabricación local. Las características nominales de la turbina son las siguientes: 120 kW generados en el eje de la turbina Michell-Banki, velocidad de giro

---

<http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/5449>

igual a 1800 rpm, 82% de eficiencia hidráulica a plena carga, velocidad específica de la turbina igual a 100, caudal de diseño igual a 0.19m<sup>3</sup> /s y salto neto igual a 75.4m. Debido a las características de las turbinas Michell-Banki, el grupo hidroenergético puede trabajar conservando una buena eficiencia en un rango de potencias desde 63.8 kW hasta 120kW, en un rango de salto neto desde 50.8m hasta 113.8 m y en un rango de caudal desde 0.11m<sup>3</sup> /s hasta 0.22m<sup>3</sup> /s.

### **2.1.3. Tesis internacionales**

*Ecuador*

*TENORIO ZURITA, NÉSTOR GERMÁN (2005)*

*TESIS DE GRADO: “Diseño e Implementación de un Prototipo de una Picocentral Hidráulica para uso Rural”*

*ESCUELA POLITECNICA DEL EJÉRCITO, SEDE LATACUNGA, Facultad de Ingeniería en Electromecánica.<sup>9</sup>*

Llegó a las conclusiones que la turbina Pelton fue la que se ajustó a los datos técnicos del lugar; pero aparte de eso, la importancia de haber utilizado este rodete se debe a la eficiencia que la misma posee. El acoplamiento realizado en el diseño fue indirecto entre el rodete – alternador, ya que en el proceso de diseño se pudo jugar con la velocidad (RPM), a efecto de controlar los números característicos de potencia y caudal que por ende se vea reflejado en el empleo de 3 o más chorros. En la realización del diseño, se logró obtener la mayor parte de las dimensiones y características de todos los componentes de la central; pero algunas medidas se las encontró de forma experimental en el proceso de construcción y se las ajustó adecuadamente hasta alcanzar el mejor funcionamiento de la central hidroeléctrica.

---

<sup>9</sup> <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/3991/1/T-ESPEL-0099.pdf>.

## 2.2. BASE TEÓRICA

En este capítulo se alcanza la base teórica para el mejor entendimiento de la investigación; denotando así todo lo que integra una Pequeña Central Hidroeléctrica desde la bocatoma, pasando por la cámara de carga y siendo conducido por la tubería forzada hasta llegar a la casa de máquinas; además, se dan algunas reglas preliminares para su diseño y se exponen los criterios utilizados para su selección.

### 2.2.1. Pequeñas centrales hidroeléctricas

Las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas son instalaciones de generación de energía eléctrica que aprovechan la energía potencial y cinética contenida en un caudal de agua, la cual es encausada a través de canales de conducción en un nivel superior y se conducen a través de túneles y tuberías de presión hasta un nivel inferior, donde entregan con mayor velocidad y energía cinética a más de un equipo turbo generador.

Las PCH se pueden clasificar de acuerdo a los siguientes estándares:

**TABLA 1. Clasificación de centrales hidroeléctricas según la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE)**

<b>POTENCIA (kW)</b>	<b>TIPO DE CENTRAL</b>
<i>0 – 50</i>	<i>MICRO – CENTRAL HIDROELECTRICA</i>
<i>50 – 500</i>	<i>MINICENTRAL HIDROELECTRICA</i>
<i>500 – 5000</i>	<i>PEQUEÑA CENTRAL HIDROELECTRICA</i>

**FUENTE: Ramiro Ortiz Flores, Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, Mc Graw Hill, 2001**

**TABLA 2. Clasificación de centrales hidroeléctricas según salto neto**

<b>TIPO DE CENTRAL</b>	<b>BAJA (mts)</b>	<b>MEDIA (mts)</b>	<b>ALTA (mts)</b>
MICRO CENTRAL	$H < 15$	$15 < H < 50$	$H > 50$
MINI CENTRAL	$H < 20$	$20 < H < 100$	$H > 100$
PEQUEÑA CENTRAL	$H < 25$	$25 < H < 130$	$H > 130$

**Fuente: Tesis “Guía para estudios de pre-factibilidad de P.C.H. como parte de sistemas híbridos”. Bogotá 2004. Universidad Pontificia Javeriana**

### **2.2.2. Casa de máquinas**

Es la edificación donde se localizan todos los equipos principales para la generación (turbina, generador, protecciones, válvula de admisión, sistemas de regulación y de conexión a la red eléctrica, y demás accesorios); allí se hace la transformación de energía hidráulica en mecánica, a su vez esta se transforma a energía eléctrica.

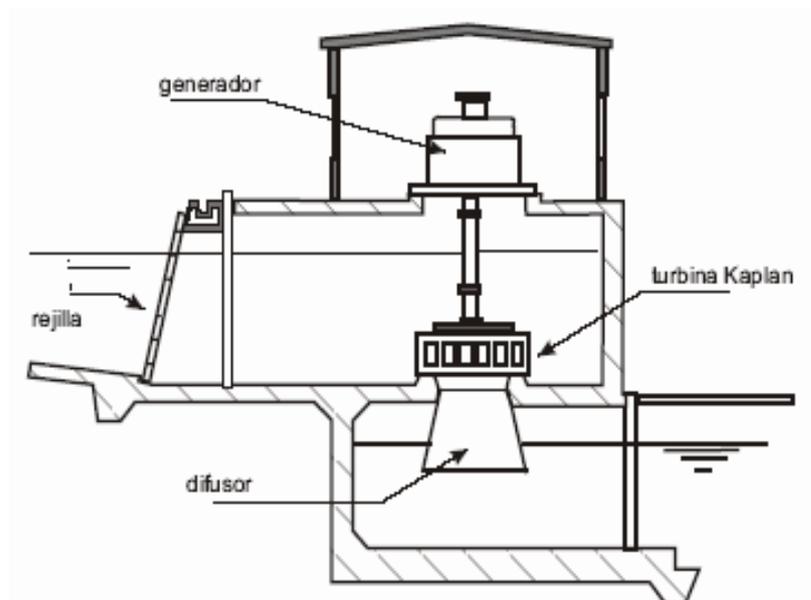
En un aprovechamiento hidroeléctrico, la casa de máquinas tiene como misión proteger el equipo electro-hidráulico que convierte la energía potencial del agua en electricidad de las adversidades climatológicas. El número, tipo y potencia de las turbinas; su disposición con respecto al canal de descarga; la altura de salto y la geomorfología del sitio, condicionan la topología del edificio.

Como se observa en las figuras 1.1 y 1.2, la casa de máquinas puede albergar los equipos siguientes:

- Compuerta o válvula de entrada a las turbinas
- Turbinas
- Multiplicadores (si se necesitan)

- Generadores
- Sistemas de control
- Equipo eléctrico
- Sistemas de protección
- Suministro de corriente continua (control y emergencias)
- Transformadores de potencia e intensidad
- Etc.

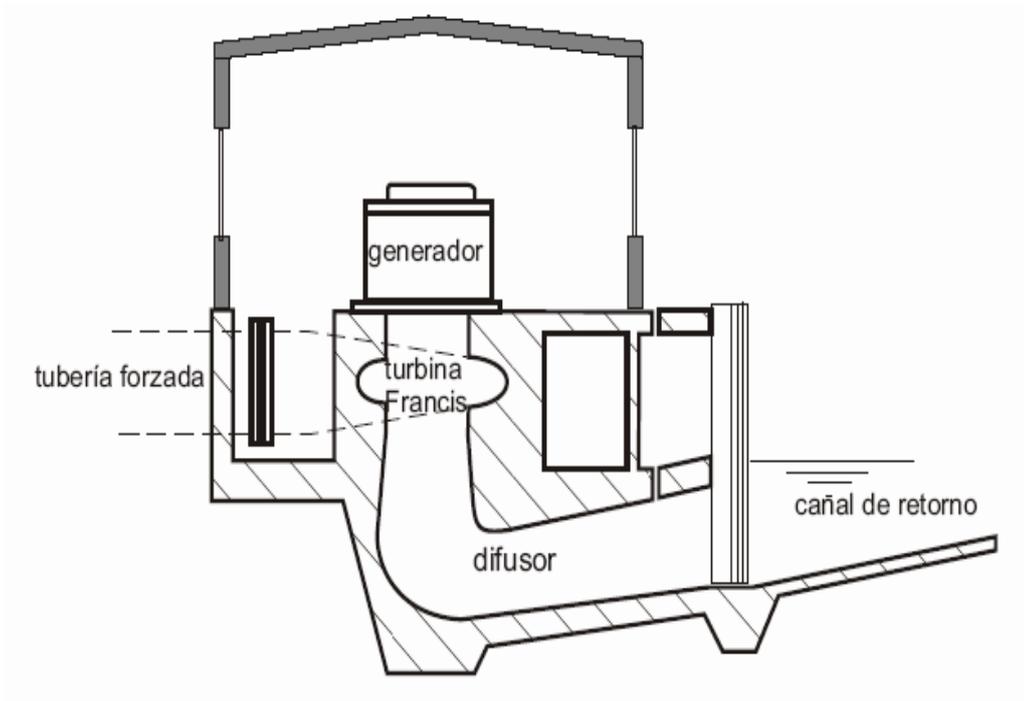
**Figura 1.2. Vista esquemática de una central de baja altura de salto**



**Fuente: Guía para el Desarrollo de una Pequeña Central Hidroeléctrica ESHA-2006, Programa de Energía Inteligente para Europa (IEE) ,1998**

La figura 1.2 muestra un esquema de una casa de máquinas con toma de agua, integrada con el azud y las rejillas, alojando una turbina Kaplan de eje vertical; acoplada directamente a un generador, al tubo difusor y al canal de retorno de uso frecuente en aprovechamientos de muy baja altura de salto. Para mitigar el impacto visual y sónico, la casa de máquinas, como se ve en la figura 1.2, puede estar enteramente sumergida.

**Figura 1.3. Vista esquemática de una central con saltos medios y altos**



**Fuente: UNS. Energía Hidráulica , Guía para el Desarrollo de una Pequeña Central Hidroeléctrica ESHA-2006, Ing. Amancio Rojas Flores**

En los aprovechamientos de montaña, en los que el salto es mediano o grande, las casas de máquinas son más convencionales (ver figura 1.3) con una entrada de la tubería forzada y un canal de retorno. La casa de máquina puede estar ubicada en el interior de una cueva y, eventualmente, aunque no es corriente, puede estar sumergida en el agua.

La casa de máquinas puede estar instalada al pie de una presa construida para crear un embalse multiusos, entre los que el de generación de energía no es prioritario.

Algunas configuraciones de turbinas permiten eliminar por completo la superestructura o reducir la cobertura a la protección del equipo eléctrico y de control, integrando turbina y generador en una carcasa impermeable (bulbo); esta puede sumergirse en el curso del agua y eliminar así la casa de máquinas.

**Figura 1.4. Perspectiva de una minicentral típica**



**Fuente: Guía para el Desarrollo de una Pequeña Central Hidroeléctrica ESHA-2006, Programa de Energía Inteligente para Europa (IEE) ,1998**

### **2.2.3. Turbinas hidráulicas**

Una turbina hidráulica tiene por objeto transformar la energía potencial del agua en energía rotacional. *El diseño de las turbinas es un papel reservado a los fabricantes*; este estudio ha considerado oportunamente el suministro de algunos criterios para el diseño, selección y cálculo de la turbina que más se ajuste a la topografía e hidrografía de la **PEQUEÑA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE EL HUAYCO**. Otorgando así fórmulas para determinar sus dimensiones fundamentales.

Estos criterios, fórmulas y diseños están basados en las distintas centrales puestas en marcha y en los diferentes manuales de **PCH** e información solicitada a distintos fabricantes peruanos y extranjeros. En todo caso, conviene subrayar que no hay información tan fiable como la ofrecida por los propios fabricantes de turbinas.

### 2.2.3.1. Tipos y configuraciones

La energía potencial del agua se convierte en energía motriz en la turbina, con arreglo a dos mecanismos básicamente diferentes:

- **En el primero**, la energía potencial se transforma en energía cinética; mediante un chorro de gran velocidad que es proyectado contra unas cazoletas fijas en la periferia de un disco. A este tipo de turbinas se las conoce como turbinas de acción. Como el agua, después de chocar contra las cazoletas, cae al canal de descarga con muy poca energía remanente; la carcasa puede ser ligera y solo tiene por misión evitar accidentes e impedir las salpicaduras del agua.

- **En el segundo**, la presión del agua actúa directamente sobre los alabes del rodete, disminuyendo de valor a medida que avanza en su recorrido. A este tipo de turbinas, se las conoce como turbinas de reacción. Al estar el rodete completamente sumergido y sometido a la presión del agua, la carcasa que lo envuelve tiene que ser suficientemente robusta para poder resistirla.

#### **A. TURBINAS DE ACCIÓN**

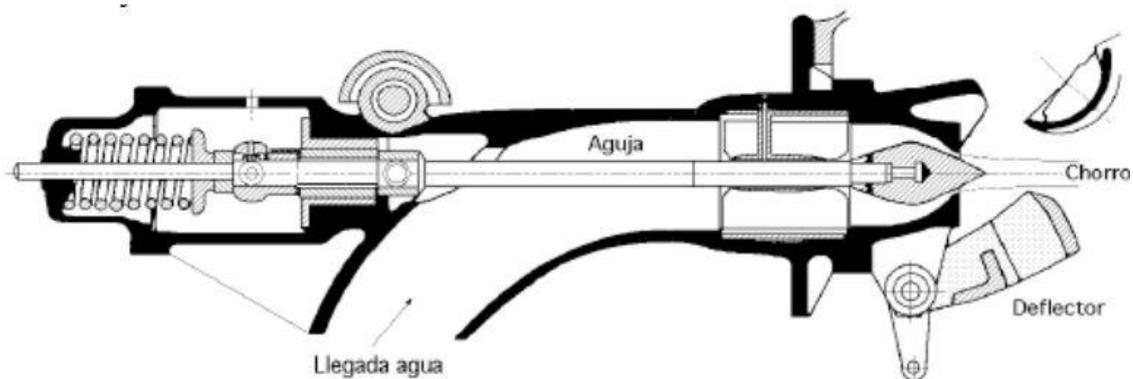
##### **TURBINA PELTON**

Son turbinas de acción en las que la tobera o toberas (una turbina de eje vertical puede tener hasta seis toberas, con uno o con dos rodetes) transforman la energía de presión del agua en energía cinética. Cada tobera produce un chorro, cuyo caudal se regula mediante una válvula de aguja (Figura 1.4).

Suelen estar dotadas de un deflector, cuya misión es desviar el chorro para evitar que al no incidir

sobre las cazoletas, se embale la turbina, sin tener que cerrar bruscamente la válvula de aguja, maniobra que podría producir un golpe de ariete. De esta forma la máxima sobrepresión no supera 1,15 veces la presión estática. Se utilizan en saltos entre 40 y 1 200 m.

**Figura 1.5. Sección transversal de una tobera con deflector**

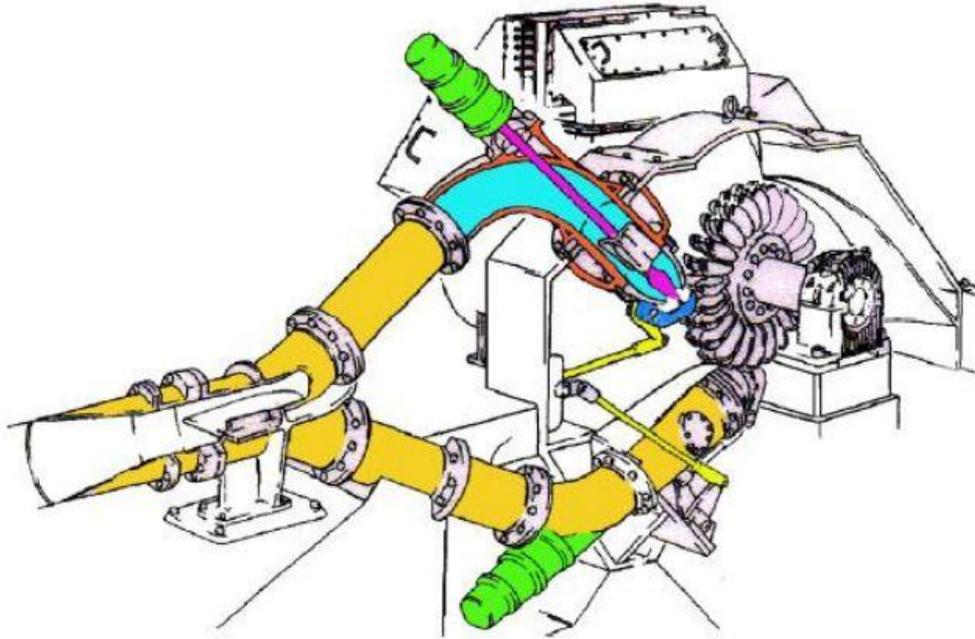


**Fuente:** Guía para el Desarrollo de una Pequeña Central Hidroeléctrica ESHA-2006

Como la energía cinética del agua al abandonar las cazoletas se pierde, estas se diseñan para que las velocidades de salida sean mínimas.

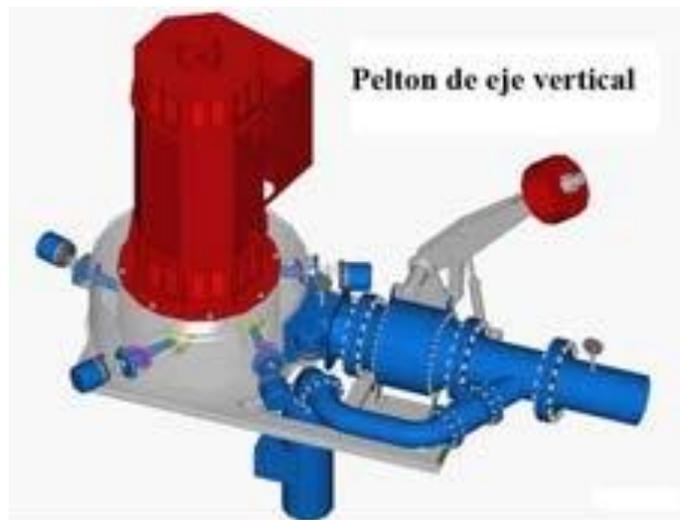
Las turbinas Pelton de una o dos toberas pueden ser de eje horizontal (Figura 1.5) o vertical. Las de tres o más toberas son de eje vertical (Figura 1.6). Seis es el máximo número de toberas en una Pelton, pero no se utilizan en turbinas para pequeñas centrales.

**Figura 1.6. Vista de una turbina Pelton de dos toberas**



**Fuente:** UNS. Energía Hidráulica, Ing. Amancio Rojas Flores

**Figura 1.7. Pelton vertical de cuatro toberas**



**Fuente:** Guía para el Desarrollo de una Pequeña Central Hidroeléctrica ESHA-2006, Programa de Energía Inteligente para Europa (IEE) ,1998

El rotor suele estar directamente acoplado al generador y situado por encima del nivel aguas abajo de la turbina. En la turbina Pelton, el chorro incide, como puede verse en la (Figura 1.7), con un ángulo de  $90^{\circ}$  respecto al plano diametral del rodete.

**Figura 1.8. Incidencia del chorro en la turbina Pelton**



**Fuente: Guía para el Desarrollo de una Pequeña Central Hidroeléctrica ESHA-2006, Programa de Energía Inteligente para Europa (IEE) ,1998**

El rendimiento de una Pelton se mantiene elevado para caudales entre el 30% y el 100% del máximo, en turbinas de una sola tobera y entre el 10% y el 100% para turbinas de dos o más toberas

## **TURBINA TURGO**

La turbina Turgo puede trabajar en saltos con alturas comprendidas entre 50 y 300 metros. Como la Pelton, se trata de una turbina de acción; pero sus alabes tienen una distinta forma y disposición. El chorro incide con un ángulo de  $20^{\circ}$  respecto al plano diametral del rodete (Figura. 1.8), entrando por un lado

del disco y saliendo por el otro. A diferencia de la Pelton, en la turbina Turgo el chorro incide simultáneamente sobre varios alabes, de forma semejante a como lo hace el fluido en una turbina de vapor. Su menor diámetro conduce, para igual velocidad periférica, a una mayor velocidad angular, lo que facilita su acoplamiento directo al generador.

**Figura 1.9. Esquema de una Turbina Turgo**



**..Fuente: UNS. Energía Hidráulica Ing. Amancio Rojas Flores**

Su rendimiento es inferior al de una turbina Pelton o una turbina Francis, y se mantiene entre límites aceptables para caudales entre el 20% y 100% del máximo de diseño.

Una Turgo puede constituir una alternativa a una Francis si el caudal es muy variable o si la tubería forzada es muy larga, ya que el deflector evita el embalamiento cuando, trabajando a plena potencia hidráulica, desaparece súbitamente la carga exterior, y el golpe de ariete que, en ese caso, produciría el cierre de la admisión a la turbina Francis.

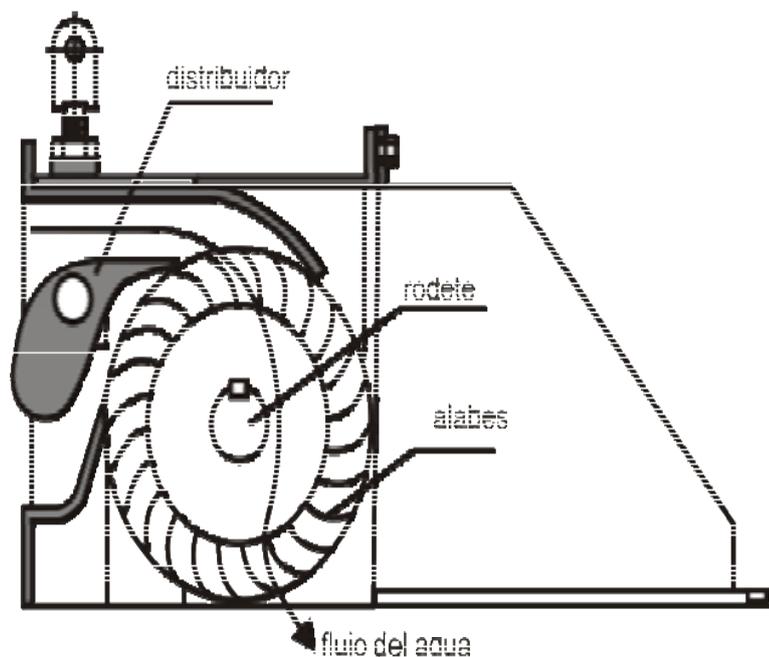
#### ✓ **TURBINA DE FLUJO CRUZADO**

Esta turbina, conocida también como Michell-Banki en recuerdo de sus inventores, se utiliza en una

gama muy amplia de alturas de salto (de 5m a 200m). Su rendimiento máximo es inferior al 87%, pero se mantienen entre límites aceptables para caudales entre el 16% y 100% del caudal máximo de diseño.

El agua (Figura 1.9) entra en la turbina a través de un distribuidor, y pasa a través de la primera etapa de alabes del rodete, que funciona casi completamente sumergido (incluso con un cierto grado de reacción). Después de pasar por esta primera etapa, el flujo cambia de sentido en el centro del rodete y vuelve a cruzarlo en una segunda etapa que es totalmente de acción. Ese cambio de dirección no resulta fácil y da lugar a una serie de choques que son la causa de su bajo rendimiento nominal. Su construcción es muy simple, por consiguiente, requiere una baja inversión.

**Figura 1.10. Esquema de una turbina de flujo transversal**



**Fuente: Guía para el Desarrollo de una Pequeña Central Hidroeléctrica ESHA-2006, Programa de Energía Inteligente para Europa (IEE) ,1998**

## ***B. TURBINAS DE REACCIÓN***

### **TURBINA FRANCIS**

Son turbinas de reacción de flujo radial y admisión total, muy utilizadas en saltos de altura media (entre 25m y 350m), equipadas con un distribuidor de alabes regulables y un rodete de alabes fijos. En las turbinas Francis rápidas, la admisión es radial y la salida es axial. La figura 1.11. Muestra una turbina Francis de eje horizontal con el tubo de aspiración en primer plano.

***Figura 1.11. Turbina Francis de eje horizontal***



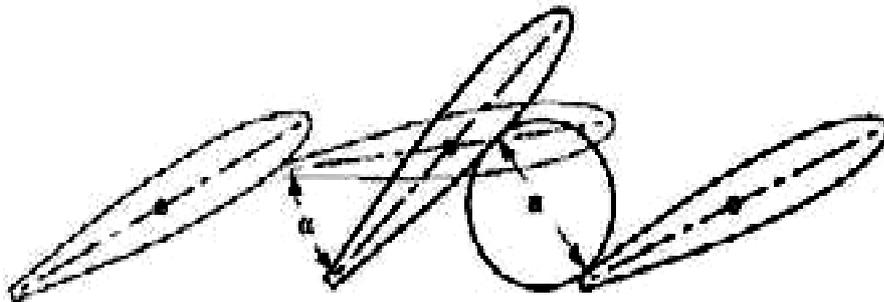
**Fuente: UNS. Energía Hidráulica , Ing. Amancio Rojas Flores**

Las turbinas Francis pueden ser de cámara abierta o de cámara en espiral unida a la tubería forzada. La espiral (Figura 1.14) está diseñada para

que la velocidad tangencial del agua sea constante y el caudal que pasa por cada sección del caracol sea proporcional al arco que le queda por abastecer. Como se ve en la Figura 1.11, el distribuidor tiene alabes directrices móviles, cuya función es regular el caudal que entra al rodete y el ángulo en que el agua incide sobre los alabes de este último. Los alabes distribuidores giran sobre su eje, mediante bielas conectadas a un gran anillo exterior que sincroniza el movimiento de todos ellos.

Estos alabes pueden utilizarse para cerrar la entrada del agua en casos de emergencia, pese a lo cual sigue siendo necesaria la válvula de mariposa que, en esos casos, cierra la entrada del agua a la espiral. El rodete transforma la energía hidráulica en energía mecánica y devuelve el agua al tubo difusor.

**Figura 1.12. Esquema de funcionamiento de los alabes directores**



**Fuente: Guía para el Desarrollo de una Pequeña Central Hidroeléctrica ESHA-2006, Programa de Energía Inteligente para Europa (IEE) ,1998**

**Figura 1.13. Accionamiento del distribuidor una turbina Francis**

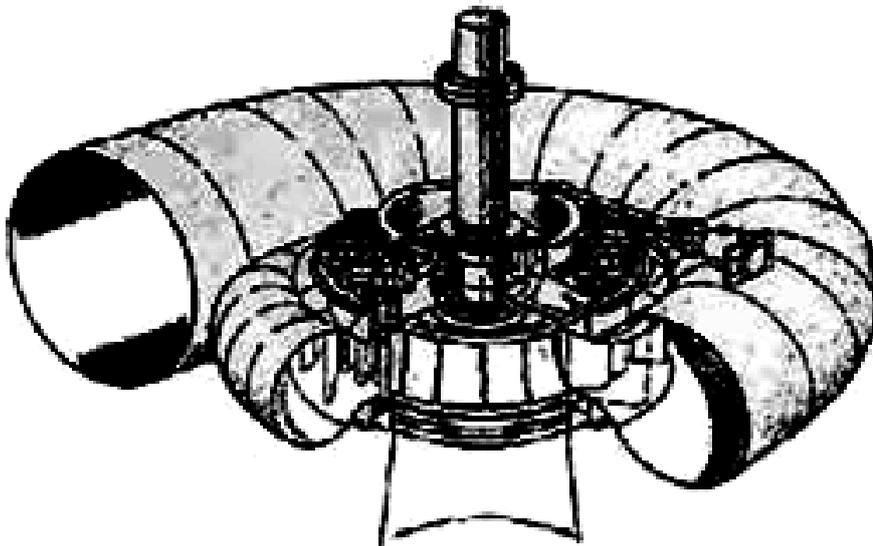


**Figura 1.14. Rodete de en una turbina Francis de eje horizontal**



**Fuente:** Guía para el Desarrollo de una Pequeña Central Hidroeléctrica ESHA-2006, Programa de Energía Inteligente para Europa (IEE) ,1998

**Figura 1.15. Vista de una turbina Francis**



**Fuente:** Guía para el Desarrollo de una Pequeña Central Hidroeléctrica ESHA-2006, Programa de Energía Inteligente para Europa (IEE) ,1998

Los rodetes de las turbinas pequeñas están contruidos generalmente en fundición de acero inoxidable. Algunos fabricantes emplean rodetes de fundición de bronce al aluminio e incluso en algunos casos rodetes fabricados por soldadura.

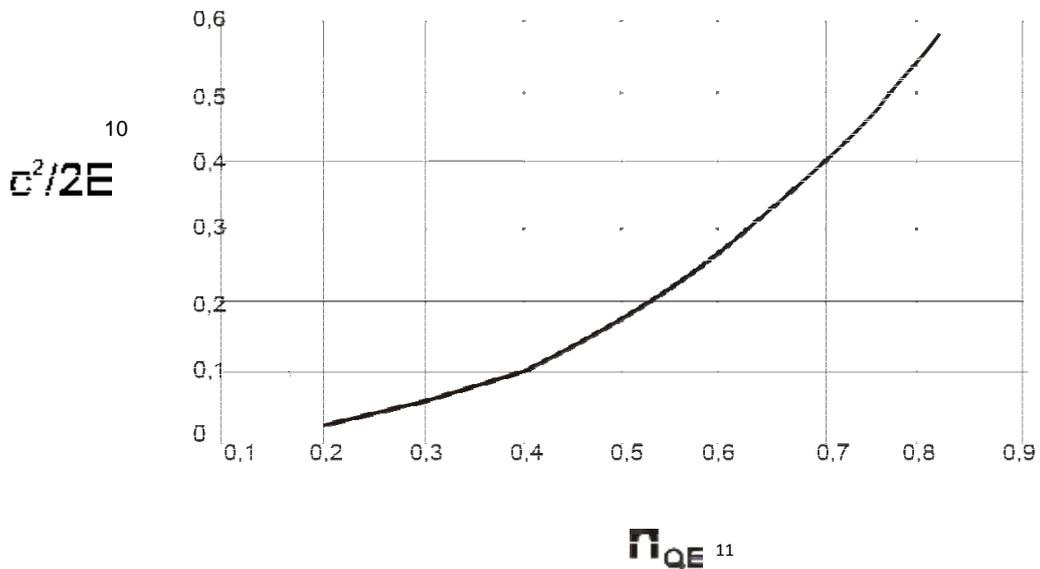
El tubo de aspiración de una turbina de reacción tiene como objetivo recuperar la energía cinética del agua que sale del rodete. Como esta energía es proporcional al cuadrado de la velocidad, uno de los objetivos del tubo de aspiración es reducir la velocidad de salida, para lo cual se emplea un perfil cónico.

Sin embargo, el ángulo del cono tiene un límite; pasado el cual se produce la separación del flujo del agua. El ángulo óptimo es  $7^\circ$  para reducir la longitud del tubo, consiguientemente su costo. En algunos casos el ángulo se aumenta hasta  $15^\circ$ .

Cuanto menor sea el salto más importante será el papel del tubo de aspiración, ya que al disminuir aquel par a potencia equivalente, aumenta el caudal nominal; por tanto, las pérdidas cinéticas correspondientes. Es fácilmente comprensible que, para un mismo diámetro del rotor, su velocidad aumenta si aumenta el caudal.

La Figura 1.15 nos muestra la energía cinética remanente del agua a la salida del rodete, en función de la velocidad específica.

**Figura 1.16. Energía cinética a la salida del rotor**



**Fuente:** Guía para el Desarrollo de una Pequeña Central Hidroeléctrica ESHA-2006, Programa de Energía Inteligente para Europa (IEE) ,1998

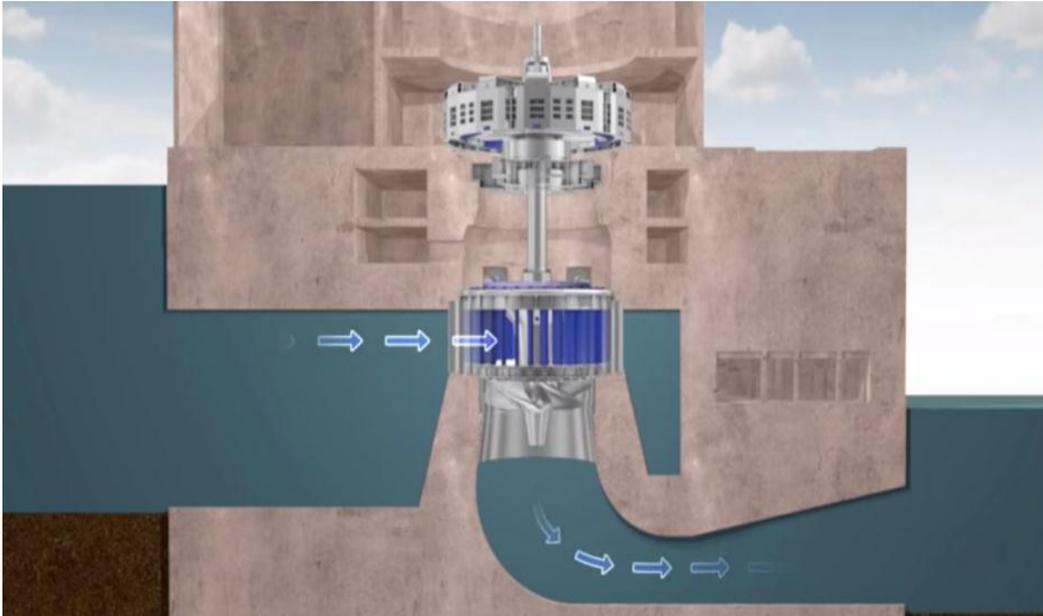
## TURBINAS KAPLAN Y DE HÉLICE

La turbina Kaplan (Figura 1.17) es una turbina de reacción de flujo axial. Generalmente utilizadas en saltos de 2 a 40m. En este caso, los alabes de la turbina son regulables junto con los distribuidores. Los alabes del rodete giran alrededor de su eje accionados por unas manivelas solidarias con unas bielas articuladas a una cruceta, que se puede desplazar por el interior del hueco del eje de la turbina, las turbinas Kaplan son de admisión radial.

<sup>10</sup> Energía cinética remanente del agua

<sup>11</sup> Velocidad Específica.

**Figura 1.17. Turbina Kaplan**

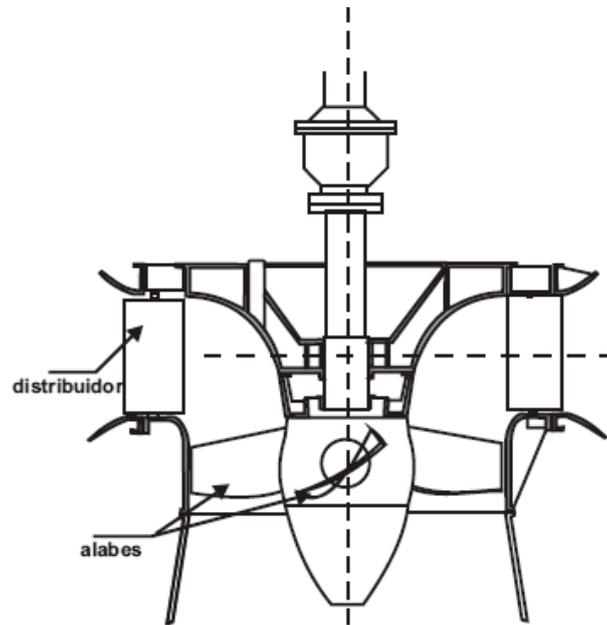


**Fuente: Oxyman Comercial SAC – Pequeña Central Hidroeléctrica del Huayco**

La doble regulación permite su utilización cuando el caudal y el salto varían en el tiempo; la turbina mantiene un rendimiento aceptable, aun cuando el caudal varíe entre el 15% y 100% del nominal de diseño.

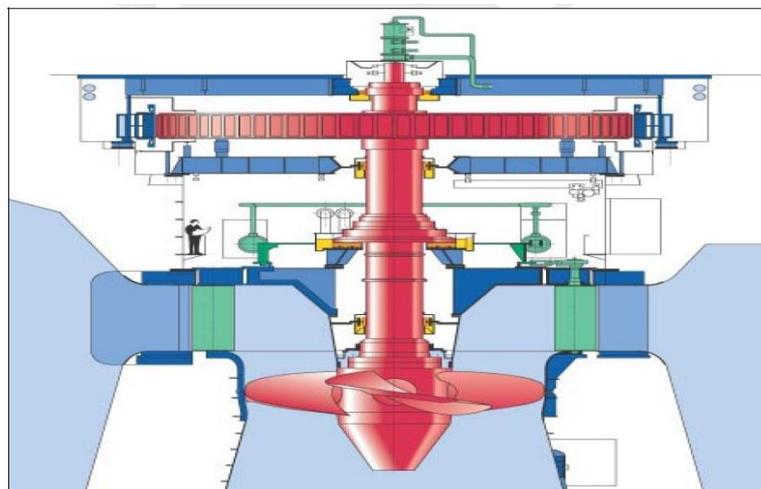
La semi Kaplan se adapta bien a variaciones del caudal (pueden trabajar entre el 30% y 100% del caudal de diseño); pero es menos flexible cuando la altura de salto varía substancialmente. La Figura 1.18. representa el esquema de una turbina Kaplan de eje vertical, de doble regulación. Los alabes del rodete giran alrededor de su eje, accionados por unas manivelas, que son solidarias de unas bielas articuladas a una cruceta, que se desplaza hacia arriba o hacia abajo por el interior del eje hueco de la turbina. Este desplazamiento es accionado por un servomotor hidráulico, con la turbina en movimiento.

**Figura 1.18. Esquema de una Kaplan vertical de doble regulación**



**Fuente:** Guía para el Desarrollo de una Pequeña Central Hidroeléctrica ESHA-2006, Programa de Energía Inteligente para Europa (IEE) ,1998

**Figura 1.19. Kaplan de doble regulación**



**Fuente:** Guía para el Desarrollo de una Pequeña Central Hidroeléctrica ESHA-2006, Programa de Energía Inteligente para Europa (IEE) ,1998.

### **2.2.3.2. Partes de una turbina Kaplan**

#### **a) Carcasa o caracol**

Según las dimensiones de la turbina se construyen de acero, concreto armado solo o con camisa de acero. Su función principal es la de transformar la energía de presión en energía cinética y cubrir las partes internas de la turbina como el distribuidor y el rodete. Pueden tener pequeños alabes difusores o ser solo tipo voluta<sup>12</sup>.

#### **b) Distribuidor**

El difusor de la carcasa y los alabes móviles del distribuidor dirigen el agua al rodete con un mínimo de pérdidas y transforman la energía de presión en energía cinética.

La movilidad de los alabes del distribuidor permite aumentar o reducir el caudal  $Q$  de entrada al rodete de acuerdo a la demanda de potencia, operando como uno o varios chiflones.

Por ejemplo, cuando se demanda mayor potencia, los alabes del distribuidor se abren para admitir el paso de mayor caudal  $Q$ ; caso contrario, se cierran cuando hay una menor demanda o rechazo de carga (figura 1.20.).

---

<sup>12</sup> Voluta: Adorno con forma de caracol o espiral

**Figura 1.20. Alabes del distribuidor de una turbina Kaplan en 3D**



**Fuente: Oxyman comercial SAC – Pequeña Central Hidroeléctrica del Huayco**

**c) Rodete**

Es el elemento principal de la turbina, donde se transforma la energía cinética en energía mecánica y es la pieza que gira a la misma velocidad de rotación síncrona  $N'$  que va acoplado al rotor del generador mediante la flecha.

**d) Tubo de aspiración o succión**

Está conectado a la salida de la turbina y en su parte final inicia la conducción hacia la descarga o desfogue. Se le llama tubo de aspiración porque crea una depresión a la salida del rodete y tiene dos funciones principales: la primera recuperar la energía cinética del agua y la segunda transformarla en energía de presión y posición, para conducir el gasto turbinado hacia el desfogue, el cual puede estar al pie de la presa o en instalaciones subterráneas (aguas debajo de túneles con longitudes considerables). Generalmente,

se construyen de acero o concreto armado con o sin blindaje (camisa de refuerzo de acero).

#### **2.2.4. Tubería forzada**

En las centrales hidroeléctricas, las tuberías forzadas o tuberías de presión, tienen la finalidad de conducir las aguas de la cámara de carga a las turbinas (Figura 1.20), debido a la diferencia de cotas que existe entre estas.

El objetivo es transformar la energía potencial que tiene la cámara de carga en energía cinética en la turbina.

***Figura 1.20. Vista de una Tubería forzada instalada***



***Fuente: Gerencia de Fiscalización Eléctrica USPP – Central Hidroeléctrica Canchayllo***

Generalmente, existen tres tipos de tuberías de presión empleadas en los saltos: metálicas, de hormigón pre comprimido

o armado y de uralita<sup>13</sup>. En la mayoría de las pequeñas centrales hidroeléctricas, se emplea tuberías de acero.

#### **2.2.4.1. Accesorios de la tubería forzada**

- **Junta de dilatación**

Son accesorios que conecta dos tubos de acero, dejando un espacio de más ó menos 1” para absorber variaciones longitudinales, debido a la variación de la temperatura.

- **Soportes o apoyos**

Sirven fundamentalmente como apoyo de la tubería de presión cuando ésta es de acero. Cuando la tubería es de PVC no se utilizan apoyos, ya que va enterrada.

- **Acoplamiento**

Los tramos de tubería son unidos mediante soldadura o brida cuando la tubería es de acero. Cuando la tubería es de PVC, el acoplamiento es rígido utilizándose pegamento, o a través de una unión flexible.

- **Anclajes**

Los anclajes se colocan para soportar los esfuerzos generados por los cambios de dirección en el perfil de la tubería de presión; generalmente, se hacen de hormigón en masa, reforzado con fierro de construcción.

#### **2.2.4.2. Válvulas**

Las válvulas se emplean, en general, para aislar determinados tramos a fin de poder intervenir en operaciones de mantenimiento o reparaciones importantes.

---

<sup>13</sup> Uralita : material compuesto de cemento y amianto que se emplea en la fabricación de placas onduladas para cubiertas de construcciones

Se escogen válvulas esféricas las cuales tienen un coeficiente de pérdida de 0.05

### 2.2.5. Juntas de dilatación

En las tuberías de presión, tiene que haber juntas de expansión o dilatación, generalmente existe una inmediatamente debajo de la cámara de carga o del anclaje superior.

### 2.2.6. Alturas de salto neto

Es la distancia vertical, medida entre la cámara de carga y el canal de descarga, de acuerdo con esto y a las características de cada turbina se ha obtenido la tabla 3:

**TABLA 3. Altura de trabajo de las turbinas**

<b>TIPO DE TURBINA</b>	<b>HORQUILLAS DE SALTO EN METROS</b>
<b>Kaplan y hélice</b>	<b>2&lt;H&lt;20</b>
<b>Francis</b>	<b>10&lt;H&lt;350</b>
<b>Pelton</b>	<b>50&lt;H&lt;1300</b>
<b>Michel-banki</b>	<b>3&lt;H&lt;200</b>
<b>Turgo</b>	<b>50&lt;H&lt;250</b>

***Fuente: Ramiro Ortiz Flores, Pequeñas Centrales hidroeléctricas, MC GRAWHIL.***

Con los datos del caudal y salto geodésico tomados de los estudios de prefactibilidad, procedemos a dimensionar la minicentral en todos sus componentes con la finalidad de garantizar el funcionamiento y la durabilidad del sistema entre los componentes a dimensionar.

- Equipamiento electromecánico
- Equipos auxiliares

### **2.2.7. Cálculo de la altura aprovechable**

Determinar la altura vertical entre la cámara de carga y la casa de máquinas es indispensable para empezar con los cálculos de los componentes de la minicentral, debido a que esto nos proporciona la potencia a obtener para nuestro estudio.

### **2.2.8. Caída neta**

La caída neta o altura neta es la altura del salto aprovechable por la turbina; es igual al salto útil menos las pérdidas de carga que tiene lugar a lo largo de la conducción forzada, reducciones, válvulas, etc.

### **2.2.9. La velocidad específica de una turbina**

Se define como la velocidad de una turbina homóloga, de un tamaño tal que con una unidad de salto produce una unidad de potencia.

### **2.2.10. Velocidad de embalamiento**

Cuando, trabajando a plena potencia hidráulica, desaparece súbitamente la carga exterior, bien sea por corte del interruptor o por falla en la excitación del alternador, la turbina aumenta su velocidad hasta alcanzar lo que se conoce como velocidad de embalamiento.

### **2.2.11. Tubo de aspiración**

También conocido como difusor, tiene la función de crear una depresión que permita recuperar la energía cinética del agua; así, incrementar la altura geométrica del salto en una distancia igual a la existente en el rodete y el nivel del canal de salida. Un difusor bien diseñado permitirá instalar la turbina por encima del nivel del canal de salida sin perder prácticamente altura de salto

El tubo de aspiración aumenta progresivamente su sección para disminuir la velocidad del agua y limitar las pérdidas, de manera que su perfil es cónico. El ángulo de conicidad no debe

superar los 7 grados para evitar que el flujo se desprege de las paredes del tubo. Sin embargo, los ángulos de conicidad bajos requieren que el tubo sea muy largo, por lo que se emplean conicidades próximas a los 15 grados.

### 2.2.12. Cavitación

Cuando la presión ejercida sobre un líquido en movimiento, desciende por debajo de su presión de vaporización, este se evapora formando gran número de pequeñas burbujas, que al ser arrastradas a zonas de mayor presión, terminan por estallar. La formación de estas burbujas y su subsiguiente estallido, es lo que constituye la cavitación. La experiencia demuestra que el estallido de esas burbujas genera impulsos de presión muy elevados, que van acompañados de fuertes ruidos (una turbina en cavitación suena como si a través de ella pasasen montones de grava), y que la acción repetitiva de esos impulsos produce una especie de corrosión difusa, formando picaduras en el metal (pitting<sup>14</sup>). Con el tiempo, esas picaduras degeneran en verdaderas grietas con arrancamiento de metal. Las elevadas temperaturas generadas por esos impulsos y la presencia frecuente de gases ricos en oxígeno, agravan la corrosión.

Un alabe sometido a cavitación aparece al cabo de cierto tiempo lleno de cavidades, lo que obliga a sustituirlo o, si aún se está a tiempo, a repararlo recargándolo por soldadura. Para evitarla, habrá que realizar ensayos de laboratorio para definir el perfil correcto de los alabes y determinar el campo de operatividad de la turbina.

---

<sup>14</sup> **Pitting** es el nombre generalizado que se utiliza para describir el daño por machucón, punteadura y adhesión, debido a que estos tres se caracterizan por presentar depresiones diferentes

## CAPÍTULO III

### PRESENTACIÓN DEL ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1. DATOS INICIALES

La **CENTRAL HIDROELÉCTRICA “EL HUAYCO”** nos entrega los siguientes datos:

Topográficos, hidrológicos, civil e información de entidades nacionales (ANA, ALA, SENAMHI)

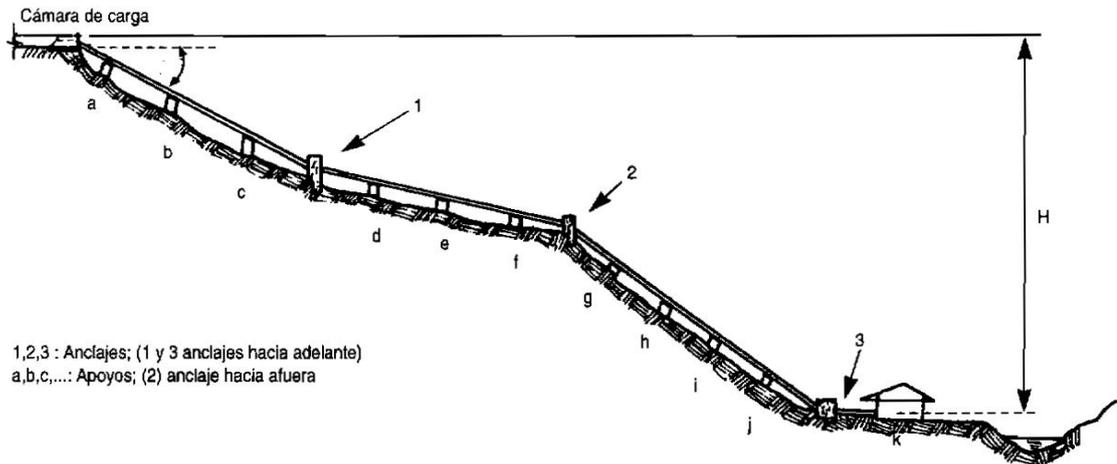
- **ALTURA TOPOGRÁFICA:** 17.5 metros (salto neto), desde la cámara de carga hasta la casa de máquinas.
- **CAUDAL:**  $Q = 7.31 \text{ m}^3/\text{s}$
- **LONGITUD DE LA TUBERÍA FORZADA:**  $L=30$  metros..

Con los datos realizaremos los cálculos correspondientes y dimensionaremos así la tubería forzada y la turbina (el enfoque principal en el que se basa esta investigación) ubicado en la casa de máquinas.

Además, demostraremos porqué la turbina Kaplan es la que más se ajusta al diseño.

### 3.2. CÁLCULOS PARA LA SELECCIÓN DE LA TUBERÍA FORZADA

**Figura 2.1. Tubería forzada en proyección a la casa de maquinas**



**Fuente: Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas: una guía para el desarrollo de proyectos/ Federico coz. Responsables de la presente edición, Teodoro Sánchez y Javier Ramírez Gastón – Lima 1995**

#### 3.2.1. Cálculo del diámetro

Fórmula de Hazen-Williams

También denominada ecuación de Hazen-Williams, se utiliza particularmente para determinar la velocidad del agua en tuberías circulares llenas o conductos cerrados; es decir, trabajan a presión.

Su formulación en función del radio hidráulico es:

**Velocidad del caudal**

$$V = 0.8494 * C * (Rh)^{0.63} * S^{0.54}$$

ECU. (01)

$$V = 26.316 \text{ m/s}$$

En función del diámetro:

**DONDE:**

Rh = Radio hidráulico = Área de flujo / Perímetro húmedo  
= Di / 4

V = Velocidad media del agua en el tubo en [m/s].

Q = Caudal o flujo volumétrico en [m<sup>3</sup>/s]

C = Coeficiente que depende de la rugosidad del tubo.

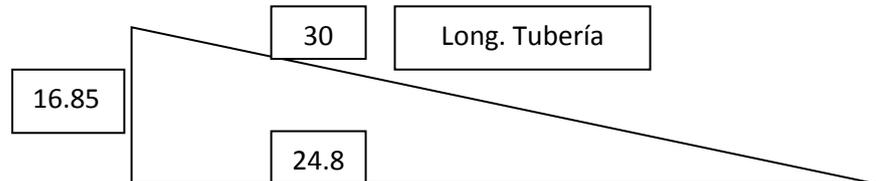
90 para tubos de acero soldado.

100 para tubos de hierro fundido.

140 para tubos de PVC.

128 para tubos de fibrocemento.

150 para tubos de polietileno de alta densidad.



$$Q = 0.275 * C * (D)^{2.63} * S^{0.54} \quad \text{ECU. (02)}$$

**DONDE:**

Di = Diámetro interior en [m]. (Nota: Di/4 = Radio hidráulico de una tubería trabajando a sección llena)

S = Pendiente - Pérdida de carga por unidad de longitud del conducto [m/m]. (16.85/24.8)

Q= Caudal (7.31) m<sup>3</sup>/s

L= Longitud de la tubería forzada (30mts)

H=Salto neto (16.85 mts)

Despejando D (Diámetro) de la ecuación (02) tenemos:

$$D = 0.5985 \text{ metros. } \sim 0.60 \text{ metros.}$$

Usando así 60cm de diámetro – introduciendo este dato en ECU.  
(01)

Obtenemos un nuevo caudal de diseño  $Q = 7.357 \text{ m}^3/\text{s}$

### 3.2.2. Material utilizado

La tubería de PVC<sup>15</sup> es una de las más empleadas en las microcentrales. Es relativamente económica, se producen en diámetros que van hasta cerca de 600mm, y es adecuada para presiones elevadas (100 a 150m). Al variar el espesor de la pared de la tubería, se obtienen diferentes niveles de presión. Es liviana y fácil de transportar e instalar. Tiene un factor de pérdidas por fricción bajo y es resistente a la corrosión. No obstante, es relativamente frágil y puede ser dañada por golpes o impactos de rocas, en especial a bajas temperaturas. La principal desventaja radica en que el PVC se deteriora cuando se expone a la luz ultravioleta. Por ello, siempre debe estar protegida de la luz solar directa, ya sea enterrándola, cubriéndola con vegetación, envolviéndola o pintándola.

La otra ventaja es que cuenta con un recubrimiento de 4mm de PVC antiabrasivo.

### 3.2.3. Cálculo del espesor de la tubería

El espesor de la tubería, además de soportar las presiones estáticas del agua, debe soportar por lo menos las sobrepresiones debido al golpe del ariete, si por algún descuido del operador el tiempo de cierre de la válvula fuera cercano al tiempo crítico, además de soportar el peso propio sin sufrir el pandeo.

El espesor de la tubería forzada se formula con la siguiente ecuación:

---

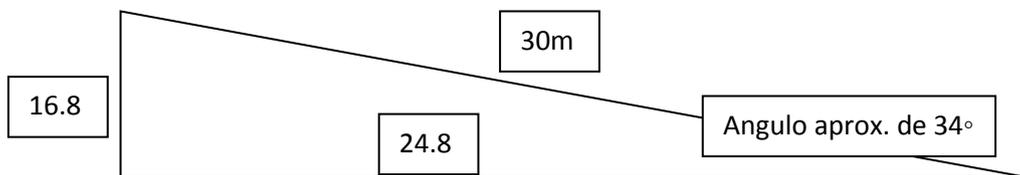
<sup>15</sup> Policloruro de vinilo

$$e = \frac{P_i * D}{2\sigma_f * K_f} + e_s = \frac{(H_c + h_s)D}{2\sigma_f * K_f} + e_s (mm) \quad \text{ECU. (03)}$$

Donde:

Pi = es la presión máxima (PRESIÓN HIDROSTÁTICA) considerando el golpe de ariete

Pi= La presión hidrostática puede ser calculada a partir de la multiplicación de la gravedad (**g**), la densidad (**d**) del líquido y la profundidad (**h**). En ecuación: = **d x g x h**



$$P_i = d \times g \times h \times \text{sen}(34) \quad \text{ECU. (04)}$$

Donde:

$$P_i = 1000 \times 9.81 \times 30 \times \text{sen}(34)$$

$$P_i = 164570.4715 \text{ pa}$$

Al hacer la conversión obtenemos

$$P_i = 164.5704715 \text{ KN/mm}^2$$

Hc = es la caída bruta (m)

hs = es la sobre presión ejercida por el golpe del ariete (m)  
obtenida en (364) = 148.1134

D = es el diámetro de la tubería (mm) = 600mm

Kf = es la eficiencia de las uniones

es = es un espesor adicional + seguridad (es = 5mm)

Se tiene que  $K_f = 0,8$  para tubos sin soldadura

$K_f = 0,9$  para uniones soldadas

$K_f = 1,0$  para uniones soldadas,  
radiografiadas y aliviado de tensiones.

$k_j = 1.1$  para tubos con juntas soldadas

$k_j = 1.2$  Plancha rolada y soldada

Factor de corrosión:  $k_c = 1\text{mm}$  (por 10 años de vida)

$K_c = 2\text{mm}$  (por 20 años de vida)

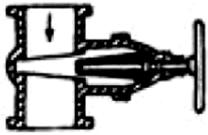
Para el PVC la resistencia de tracción del material  $\sigma_f$  es de 1400  
KN/mm<sup>2</sup>

$$e = 28.39 \text{ mm}$$

#### 3.2.4. Cálculo de las pérdidas por válvula

$$h_v = k_v \frac{v^2}{2g} \text{ (m)} \quad \text{ECU. (05)}$$

**Tabla 4. coeficiente de pérdidas por válvulas**

compuerta	mariposa	esférica	excentrica
			
$K_v=0,2$	$K_v=0,6$	$K_v=0,05$	$K_v=1,0$

**Fuente:** Guía para el Desarrollo de una Pequeña Central Hidroeléctrica ESHA-2006, Programa de Energía Inteligente para Europa (IEE) ,1998.

**DONDE:**

V= velocidad en el tubo

g= gravedad

Kv= Coef. de pérdida

$$h_v = 0.1341 \text{ metros (pérdida por válvulas)}$$

**3.2.5. Peso**

El peso de la tubería y del agua es igual a:

$$F = \bar{Y}_t \times \pi \times e \times (D + e) + \bar{Y} \times \pi \frac{D^2}{4}$$

ECU. (06)

**DONDE:**

$\bar{Y}_t$  = es el peso específico de la tubería

$\bar{Y}$  = es el peso específico del agua

$\bar{Y} = 1000 \text{ (kgf/m}^3\text{)}$

Para tubería del PVC:  $\bar{Y}_t = 7850 \text{ (kgf/m}^3\text{)}$

$$F = 1400 * \pi * 0.03158 * (0.6 + 0.03158) + 1000 * \pi \frac{0.6^2}{4}$$

$$F = 361.21 \text{ (tf/m)}$$

**3.2.6. Longitud**

30 metros<sup>16</sup>

---

<sup>16</sup> 30 metros – longitud de diseño dado por la parte civil

### 3.2.7. Cálculos en juntas de dilatación

En las tuberías de presión de acero, tienen que haber juntas de expansión o dilatación; generalmente, existe una inmediatamente debajo de la cámara de carga o del anclaje superior. La dilatación de la tubería debe ser calculada como sigue:

$$E = \alpha * \Delta T * L \quad \text{ECU. (07)}$$

**DONDE:**

E = Dilatación en metros

$\alpha$  = coeficiente de dilatación del PVC tomado ( $50 \cdot 10^{-6}$ )

$\Delta T$  = cambio de temperatura experimentada por la tubería (c)

L = longitud de la tubería (m)

$$E = (50 \cdot 10^{-5}) \cdot 23 \cdot 30 \text{m}$$

$E = 34.5 \text{mm}$
----------------------

Por factor de seguridad habrá que tomar 38mm

### 3.2.8. Cálculo de pérdidas

- **Pérdidas por fricción**

Se debe fundamentalmente a la fricción que existe entre la pared del tubo y el flujo de agua, ya que la distribución de la velocidad en el tubo es parabólica.

El caudal nominal calculado para el que diseñamos, es de  $7.357 \text{m}^3/\text{s}$ . El material del tubo considerado es acero al carbono. La pérdida de carga se calcula con la ecuación de Darcy-Weisbach.

$$h_f = f \frac{L v^2}{D 2g} \quad \text{ECU. (08)}$$

**DONDE:**

f = es el factor de fricción

L = Longitud del tubo en (m)

D = diámetro de la tubería (m)

V = velocidad dentro del tubo (m/s)

g = cte. gravitacional

El factor de fricción equivale a:

$$f = 0,01 * \left( \frac{K}{D} \right)^{0,134} \quad \text{ECU. (09)}$$

Donde la constante k depende del tipo de material según se muestra en la siguiente tabla:

**TABLA 5. Material del tubo**

MATERIAL DEL TUBO	K
Tubo de acero (nuevo)	1.15
Tubo de hierro fundido (nuevo)	2.50
Tubo de acero corroído	5.00
PVC	0.5

**Fuente: Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas: una guía para el desarrollo de proyectos/ Federico coz. Responsables de la presente edición, Teodoro Sánchez y Javier Ramírez Gastón – Lima 1995**

La constante k para el PVC es =0.5 ,

se tiene que el factor de fricción es:

$$f=0.01 * (0.5/0.6)^{0.134} = \boxed{0.009}$$

Las pérdidas por fricción reemplazando datos en la - ECU. (08)

$$L= 30\text{m}$$

$$V= 26.316\text{m/s}$$

$$D=0.6\text{m}$$

$$\boxed{H_f = 0.0073\text{metros}}$$

- **Pérdida de carga por accesorios**

En general, la ecuación de las pérdidas de carga secundaria o por accesorios obedecen a la siguiente ecuación:

$$h_a = k_a \frac{v^2}{2g} \quad \text{ECU. (10)}$$

Donde:

$h_a$  es valor de la pérdida de carga (m) por cada accesorio,  
 $k_a$  es coeficiente de pérdida de carga que toma valores diferentes para cada accesorio.

V: velocidad del agua

g: gravedad

- **Pérdida de carga por la rejilla**

En la cámara de carga, a la entrada de la tubería forzada, suele instalarse una rejilla para impedir el paso del material flotante. El agua al atravesar la rejilla, genera una turbulencia que se traduce en una pérdida de carga. Aunque generalmente es pequeña, esta pérdida de carga se calcula con la ecuación de Kirchner

$$h_r = k \left( \frac{t}{b} \right)^{\frac{4}{3}} \left( \frac{v^2}{2g} \right) \text{sen } \beta \quad \text{ECU. (11)}$$

$\frac{3}{4} = 0.75$

Donde:

$H_r$  = pérdida por carga

$t$  = es el espesor de la barra

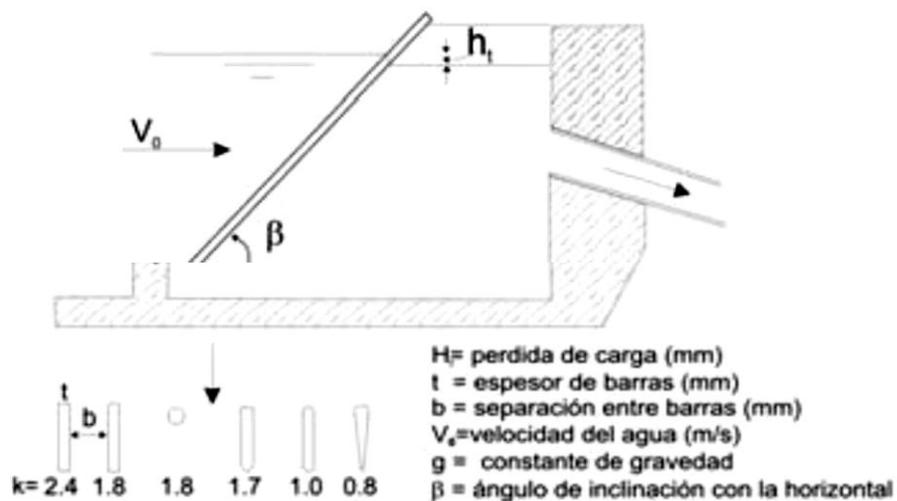
$b$  = la separación entre barras

$v$  = la velocidad del agua, separación entre barras

$\beta$  = es el ángulo de inclinación de la rejilla con la horizontal

$k$  = es un parámetro que depende de la forma de la rejilla que varía desde 2.0 hasta 0.8.

**Figura 2.2. Pérdida de carga por rejilla.**



**Fuente:** Guía para el Desarrollo de una Pequeña Central Hidroeléctrica ESHA-2006, Programa de Energía Inteligente para Europa (IEE) ,1998.

Haciendo los cálculos respectivos, la pérdida sale igual a 0.0023 metros

- **Pérdida de carga del empalme de la cámara de carga a la tubería forzada**

$k_a = 0.03$ , del cual resulta que la pérdida de carga por empalme es 0.026 metros

- **Pérdida de carga en las válvulas de la compuerta**

$k_a = 0.2$ , del cual sale, que la pérdida de carga por válvula de la compuerta es 0.175 metros

- **Pérdida de carga en los codos y cambios de dirección**

$k_a = 0.2$ , entonces la pérdida de carga por válvula de la compuerta es 0.175 metros

- **Pérdidas de contracción a la cámara espiral**

$k_a = 0.02$ , del cual sale que la pérdida de carga por la contracción es 0.018 metros

En conclusión, la suma de todas las pérdidas de carga es 0.6503 metros; es aproximadamente menor al 4% recomendando.

### **3.2.9. El golpe de ariete**

Al final de la tubería forzada, antes de la turbina, se coloca una *válvula de cierre*, que funciona como válvula de seguridad. Si por necesidad de funcionamiento esta válvula se cierra de forma brusca o instantánea, se producirán unas ondas de presión en la tubería; fenómeno denominado golpe de ariete.

Al cerrarse bruscamente la válvula, toda el agua que hay en la tubería no se detiene de forma inmediata; sino que sigue fluyendo hacia su interior, produciéndose una compresión del agua y esta genera una sobrepresión sobre la tubería y en la válvula. Esta sobrepresión produce un ligero ensanchamiento de la tubería, ya que esta es elástica.

La onda de sobrepresión avanza desde la válvula hacia la cámara de carga a una velocidad  $C^*$ , su expresión es:

$$c = \sqrt{\frac{10^{-3} k}{\left(1 + \frac{kD}{Et}\right) \rho}} \quad \text{ECU. (12)}$$

**DONDE:**

$k$  = módulo de elasticidad del agua:  $2.1 \times 10^6 \text{ N/m}^2$

$D$  = diámetro interior de la tubería 0.6m

$E$  = módulo de la elasticidad del material de la tubería ( $\text{N/m}^2$ )  $2.1 \times 10^9$

$t$  = espesor de la pared de la tubería (mm)

Como el agua en la tubería tiene velocidad, adicionalmente existe la velocidad de frente onda debido al cierre brusco de la válvula; entonces aparece el concepto de *Celeridad* y se expresa como:

$$C = \frac{C^*}{\left(1 + \frac{E_t D}{E_t e}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{ECU. (13)}$$

**DONDE:**

$C$  = celeridad (m/s),

$E_t$  = módulo de elasticidad de material del tubo ( $\text{kg/m}^2$ )

$D$  = diámetro de la tubería forzada,

$e$  = espesor de la tubería (m).

Haciendo los cálculos respectivos, para las propiedades del tubo y el agua, la celeridad resulta:

1217.09 m/s

La magnitud de la *sobrepresión* se expresa con la ecuación de Alleivi:

$$P^* = \rho_a C V \quad \text{ECU. (14)}$$

Siendo:

$P^*$  = sobrepresión para *cierre brusco* (Kg/m<sup>2</sup>), el cual se debe convertir a metros columna de altura de agua

$\rho_a$  = densidad del agua

$V$  = velocidad media del agua en la tubería forzada

Para este caso se va a considerar una velocidad promedio de 5.5m/s. Reemplazando valores y haciendo las conversiones, resulta la sobrepresión debido al cierre brusco igual a 683.05 metros.

Durante el tiempo que la onda de sobrepresión avanza aguas arriba, una pequeña cantidad de agua sigue entrando en la tubería. Una vez que la onda de *sobrepresión* ha alcanzado la cámara de carga, el agua actúa como si se tratase de un muelle, apareciendo una *onda de depresión* que impulsa el agua desde la válvula hacia la cámara de carga. En estas condiciones en el interior de la tubería se llega a hacerse *el vacío*, generándose la situación más peligrosa en el funcionamiento de la tubería. Estas oscilaciones de sobrepresión y depresión se repiten de forma similar al movimiento de un muelle, viéndose amortiguadas por el rozamiento del agua con la tubería.

El tiempo que la Celeridad tarda en recorrer un ciclo completo; es decir, ida y vuelta a la válvula, se le denomina *tiempo crítico* y se expresa como sigue:

$$T_c = \frac{2L}{c} \quad \text{ECU. (15)}$$

Siendo:  $T_c$  tiempo crítico (s);  $L$  es la longitud de la tubería forzada, 30m; reemplazando valores, resulta 0.0493 segundos.

Para evitar el golpe de ariete, la solución es hacer el cierre de la *válvula más lenta*; se recomienda que el tiempo  $T$  de cierre lento debe ser *hasta diez veces mayor* que el tiempo crítico. Entonces, los valores del golpe de ariete arriba calculados se pueden ignorar, ya que no se llega a formar sobrepresiones tan grandes. Es decir, si  $T > T_c$  no se desarrolla completamente la sobrepresión  $P^*$  debido a que las ondas negativas reflejadas que llegan a la válvula después del tiempo  $T$  son contrarrestados por la sobrepresión. Para tales cierres lentos de válvula, se calcula la sobrepresión con la fórmula de Allievi

$$P' = P_0 \left( \frac{N}{2} \pm \left( \frac{N^2}{4} + N \right)^{\frac{1}{2}} \right) \quad \text{ECU. (16)}$$

Siendo:

$$b \quad N = \left( \frac{LV\rho}{P_0T} \right)^2 \quad \text{ECU. (17)}$$

**DONDE:**

$P'$  = la sobrepresión de cierre lento (m).

$P_0$  = presión estática neta (kg/m<sup>2</sup>), en este caso es de 16.85m

$V_p$  = velocidad promedio 5.5m/s.

Por lo tanto, si el tiempo de cierre fuera diez veces el tiempo crítico, es decir, 0.493 segundos, para los datos anteriores la sobrepresión  $P'$  que se genera, sería de 83.35 metros o 8.335kg/cm<sup>2</sup> y una subpresión (negativa-succión) de - 13.99 metros.

En conclusión, las grandes sobrepresiones en el golpe de ariete, queda claramente establecido que el tiempo de cierre

mínimo debe ser de 0.49 segundos o más, caso contrario se generaría sobrepresiones peligrosas.

### 3.3. CÁLCULOS PARA LA SELECCIÓN DE UNA TURBINA

Existen criterios bien conocidos para la selección de las turbinas

- Altura de salto o salto neto
- Selección por caudal – salto neto
- Velocidad específica

#### 3.3.1. Selección por altura o salto neto

En la Tabla 6 se especifica, para cada tipo de turbina, la horquilla de valores de salto neto dentro con la que puede trabajar. Obsérvese que hay evidentes solapamientos, de modo que para una determinada altura de salto pueden emplearse varios tipos de turbina.

Nuestra altura neta está dada por 17.5mts (altura total), tiende a ser una Kaplan más que una turbina Francis; este criterio se va a ir demostrándose más adelante.

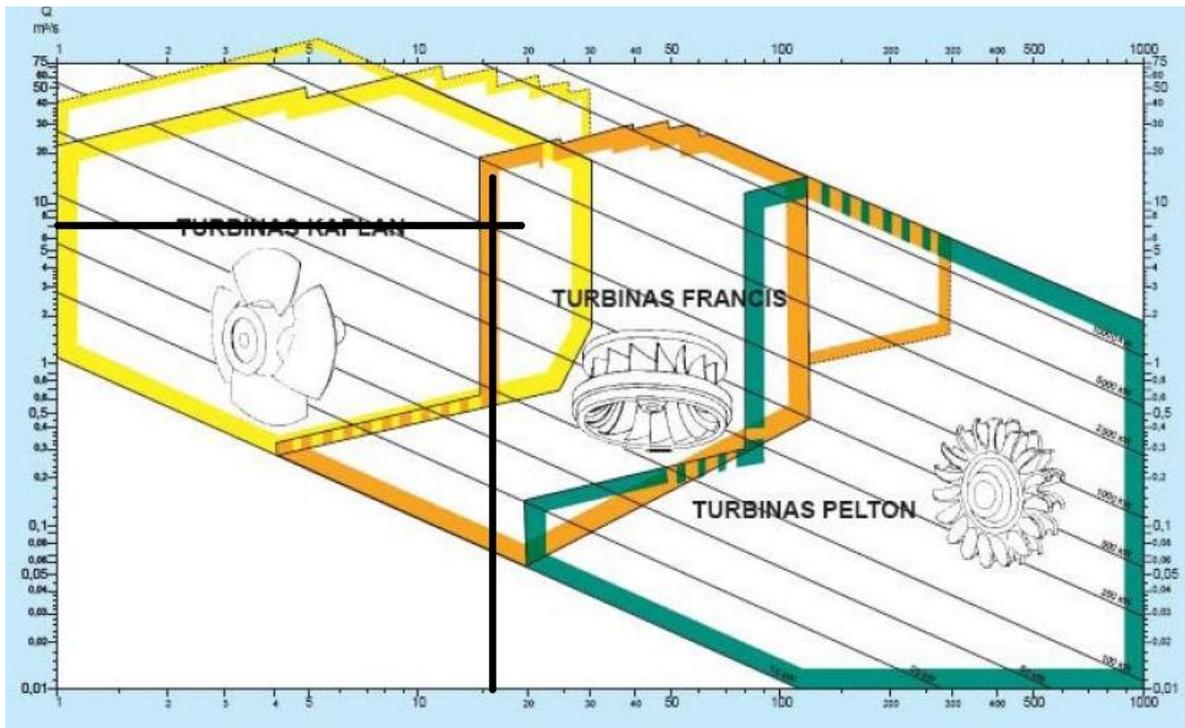
**TABLA 6. Horquilla de salto en metros**

<b>Tipo de turbina</b>	<b>Altura de salto en m</b>
Kaplan y hélice	$2 < H_n < 40$
Francis	$25 < H_n < 350$
Pelton	$50 < H_n < 1.300$
Michel – Banki	$5 < H_n < 200$
Turgo	$50 < H_n < 250$

**Fuente:** Guía para el Desarrollo de una Pequeña Central Hidroeléctrica ESHA-2006, Programa de Energía Inteligente para Europa (IEE) ,1998.

### 3.3.2. Selección por altura o salto neto vs caudal

TABLA 7. Caudal vs altura del salto



Fuente: Fuente: Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas: una guía para el desarrollo de proyectos/ Federico coz. Responsables de la presente edición, Teodoro Sánchez y Javier Ramírez Gastón – Lima 1995

### 3.3.3. Selección por velocidad específica de la turbina

**TABLA 8. Selección de turbina por velocidad específica**

Características principales de turbinas hidráulicas							
TURBINA	Inventor y año de patente	$N_s$ (rpm, HP, m) rpm	Q m <sup>3</sup> /s	H m	P kW	$\eta_{m\acute{a}x}$ %	
A C C I Ó N	PELTON	Lester Pelton (EE.UU.) 1880	1 Ch: 30 2 Ch: 30-50 4 Ch: 30-50 6 Ch: 50-70	0.05-50	30-1800	2-300000	91
	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
R E A C C I Ó N	Bomba rotodinámica	Dionisio Papin (Francia) 1689	30-170	0.05-0.25	10-250	5-500	80
	FRANCIS	James Francis (G. Bretaña) 1848	L: 60-150 N: 150-250 R: 250-400	1-500	2-750	2-750000	92
	DERIAZ	P. Deriaz (Suiza) 1956	60-400	500	30-130	100,000	92
	KAPLAN y de hélice	V. Kaplan (Austria) 1912	300-800	1000	5-80	2-200000	93
N	AXIALES: - Tubular - Bulbo - Generador periférico	Kuhne-1930 Hugenin-1933 Harza-1919	300-800	600	5-30	100,000	93

Nota.  $N_s$ : velocidad específica  
Ch: chorro  
L: lento  
N: normal  
R: rápida

Fuente: Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas: una guía para el desarrollo de proyectos/ Federico coz. Responsables de la resente edición, Teodoro Sánchez y Javier Ramírez Gastón - Lima 1995

**TABLA 9. Rango de velocidades específicas del generador para cada tipo de turbina**

Pelton de una tobera	$0,005 < \eta_{QE} < 0,025$
Pelton de n toberas	$0,005 * n^{0,5} < \eta_{QE} < 0,025 * n^{0,5}$
Francis	$0,05 < \eta_{QE} < 0,33$
Kaplan, hélice, bulbos	$0,19 < \eta_{QE} < 1,55$

**Fuente: Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas: una guía para el desarrollo de proyectos/ Federico coz. Responsables de la presente edición, Teodoro Sánchez y Javier Ramírez Gastón-Lima 1995**

### 3.3.4. Clasificación según el grado de reacción

Las turbinas hidráulicas según el grado de reacción,<sup>17</sup> se clasifican en dos grupos: turbinas de acción y turbinas de reacción.

Esta clasificación se funda en el concepto del grado de reacción: si el grado de reacción es cero, la turbina se llama de acción; si el grado de reacción es distinto a cero, la turbina se llama de reacción.

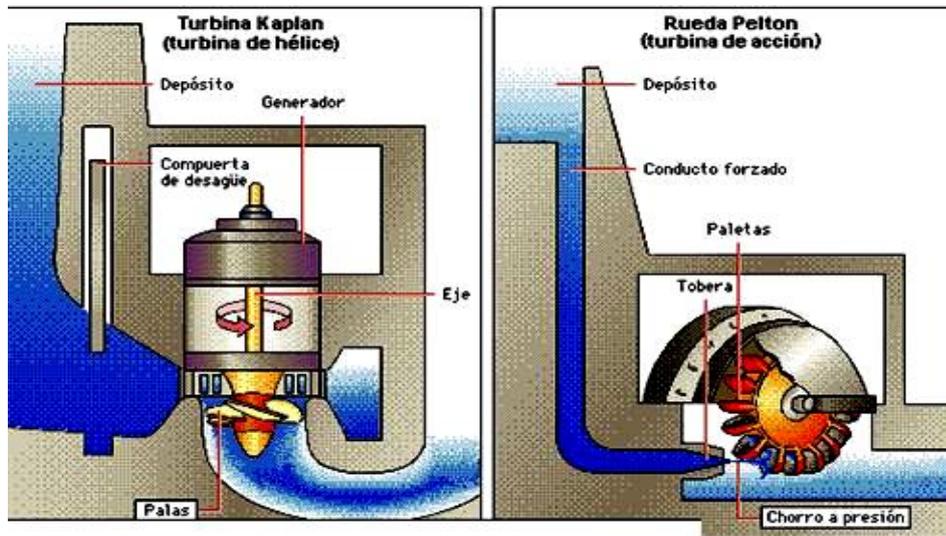
El grado de reacción de una bomba se mide así:

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

Análogamente, el grado de reacción de una turbina =  $\sigma$ , es la relación existente entre la altura de presión en el rodete y la altura  $H_n$

<sup>17</sup> <http://www.aiu.edu/publications/student/spanish/180-207/THERMODYNAMIC.html>

**Figura 2.3. Altura de la presión en el rodete**



**Fuente: Elección Pelton - Francis**

De acuerdo con esto, se tiene que:<sup>18</sup>

- Si  $R = 0$  se trata de una máquina de acción
- Si  $R = 1$  se trata de una máquina de reacción pura
- Si  $R < 1$  se trata del caso habitual de las máquinas reales

Es habitual construir [turbinas de vapor](#) y [turbinas de gas](#) con un grado de reacción igual a 0,5

Con el grado de reacción, se puede sacar conclusiones sobre la forma necesaria de las paletas. Entre los puntos situados inmediatamente antes y después de la rueda para un mismo radio, existe una diferencia de presiones  $\Delta p$ ; por lo tanto, el rotor recibe un empuje.

Puesto que la caída de presión es solo en el rotor, el grado de reacción es igual a uno; es decir, 100% de reacción: la energía total a través del rotor se transforma en energía estática. Como  $w_2 \neq w_1$ , de la última ecuación de GR:<sup>19</sup>

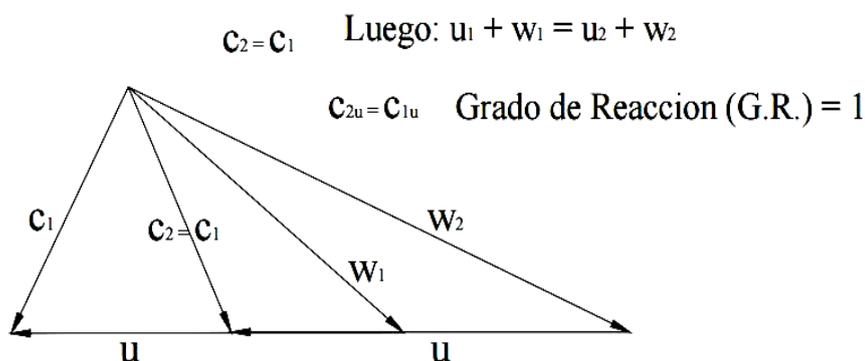
$$c_2^2 - c_1^2 = 0 \Rightarrow c_2 = c_1 \quad y \quad c_{2u} = c_{1u}$$

<sup>18</sup> [https://es.wikipedia.org/wiki/Grado\\_de\\_reacci%C3%B3n](https://es.wikipedia.org/wiki/Grado_de_reacci%C3%B3n)

<sup>19</sup> [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/monografias/basic/maldonado\\_qf/maldonado\\_qf.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/monografias/basic/maldonado_qf/maldonado_qf.pdf)

Este resultado se muestra a continuación:

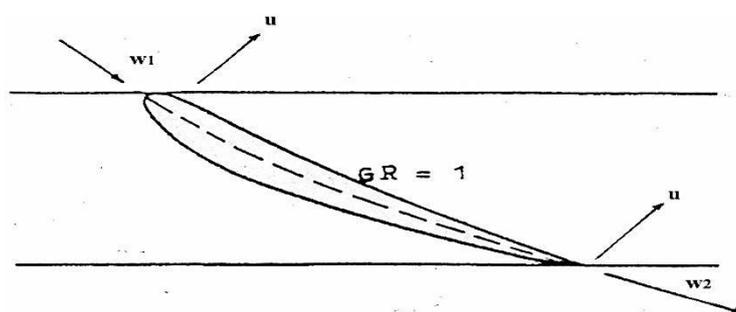
**Figura 2.4: Triángulo de velocidades**



**Fuente: Minicentral Hidroeléctrica – Néstor Gutiérrez Fernández**

Como se puede apreciar, la expansión se realiza totalmente en las paletas del rotor; las cuales tendrán un perfil como el de la figura 2.5.

**Figura 2.5: Perfil de las palas**



**Fuente: Minicentral Hidroeléctrica – Néstor Gutiérrez Fernández**

### 3.4. CÁLCULOS PARA LA TURBINA (parámetros establecidos para una turbina Kaplan)

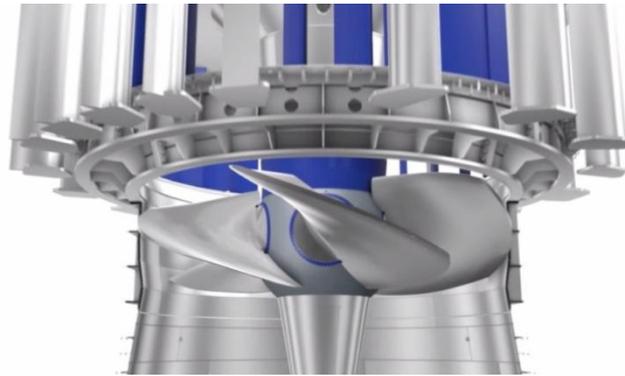
Los cálculos, diseño y selección de la turbina Kaplan son elaborados mediante parámetros y fórmulas, tanto de las diferentes Kaplan existentes (Figura 2.6), como del libro (manual para la elaboración de pequeñas centrales hidroeléctricas)<sup>20 21</sup>

<sup>20</sup> Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica – ESHA 2016.

<sup>21</sup> Guía de diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas - INEA, Santa Fe de Bogota, D.C. Colombia, 1997

A través de dicha turbina, se desarrollarán los cálculos correspondientes ya que para cada tipo de turbina varían algunos cálculos.

**Figura 2.6: Turbina Kaplan de doble regulación**



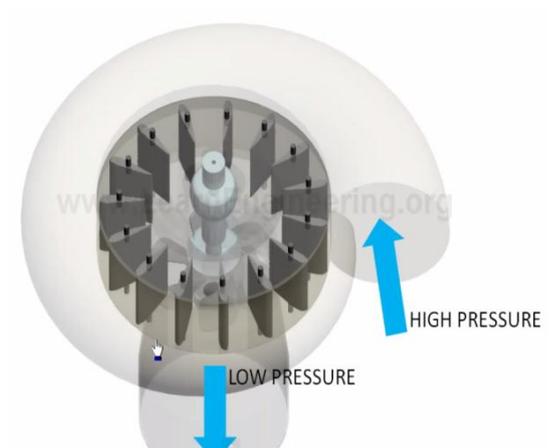
**Fuente: Oxyman Comercial SAC – Pequeña Central Hidroeléctrica del Huayco**

### 3.4.1. Forma de trabajo de una turbina Kaplan

**Figura 2.7. Kaplan en proyección**



**Figura 2.8. Forma de trabajo Kaplan**



**Fuente: Oxyman Comercial SAC – Pequeña Central Hidroeléctrica del Huayco**

### 3.4.2. Cálculo de la potencia de la turbina

#### PRIMER CÁLCULO INICIAL

#### LA POTENCIA TEÓRICA

La potencia disponible para un caudal Q y un salto H viene dada por la ecuación:

- Potencia teórica del salto

$$P=1000*g*Q*Hs$$

ECU. (19)

#### DONDE:

g = gravedad = 9.81m/s<sup>2</sup>

Q = caudal = 7.357

Hs = altura del salto 16.85m

$P= 1090.332 \text{ kW}$
--------------------------

- Potencia en el eje del generador (potencia nominal)

$$Pg=1000*g*Q*H*nt$$

ECU. (20)

nt = rendimiento de la turbina se aproxima a 0.92

$Pg= 1003.61.6 \text{ kW}$
----------------------------

- Potencia eléctrica suministrada al generador

$$Pa=1000*g*Q*H*nt*ng$$

ECU. (21)

$\eta_g$  = rendimiento del generador es 0.90

$$P_a = 1000.49 \text{ kW}$$

### 3.4.3. Cálculo para hallar la velocidad específica de una turbina

Se define como la velocidad de una turbina homóloga de un tamaño tal que con una unidad de salto, produce una unidad de potencia. De acuerdo con la anterior definición y las citadas normas, la velocidad específica de una turbina viene dada por la fórmula:

$$\eta_{QE} = \frac{n\sqrt{Q}}{E^{1/4}} \quad \text{ECU. (22)}$$

**DONDE:**

Q = caudal (m<sup>3</sup>/s)

E = energía hidráulica específica de la máquina [J/kg]

n = velocidad rotacional de la turbina [rps]

$\eta_{QE}$  no es un parámetro adimensional. Cuando se calcula en unidades SI, la velocidad específica  $\eta_s$  viene dada por la fórmula:

$$\eta_s = \frac{n\sqrt{P}}{H^{5/4}} \quad \text{ECU. (23)}$$

$$n_s = 634.90 \text{ RPM}$$

**DONDE:**

n = velocidad en rpm, - 720 rpm (velocidad de diseño)

P = potencia en kW – 1000.49 kW (potencia real)

H = altura de salto neta en metros. 16.85 m

$\eta_s = 995 * \eta_{QE}$

$$\eta_{QE} = ns/995$$

$$\eta_s = 636.76 \text{ rpm (velocidad específica del generador)}$$

$\eta_{QE} = 0.6381$
----------------------

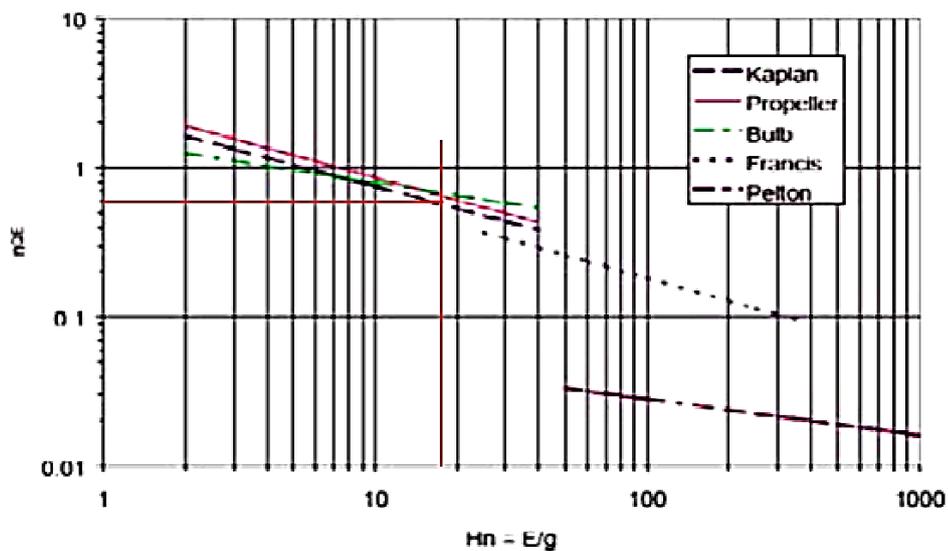
Demostrando así que estamos dentro de la selección de una turbina Kaplan en la tabla 9.

Extrayendo los datos de la tabla 9 observamos que estamos dentro del rango de la velocidad específica establecida.

**TABLA 9. Correlación entre la altura de salto neto  $H_n$  y velocidad específica  $H_{qe}$**

0.19<<<<<<	$\eta_{QE} =$	<<<<< 1.55
$\eta_{QE} =$	0.63996	

**TABLA 9. Correlación entre altura de salto neto  $H_n$  y velocidad específica  $H_{qe}$**



Fuente: Equipos electromecánicos, UNS – Energía Hidráulica, Ing. Amancio R. Rojas Flores

### 3.4.4. Curvas características

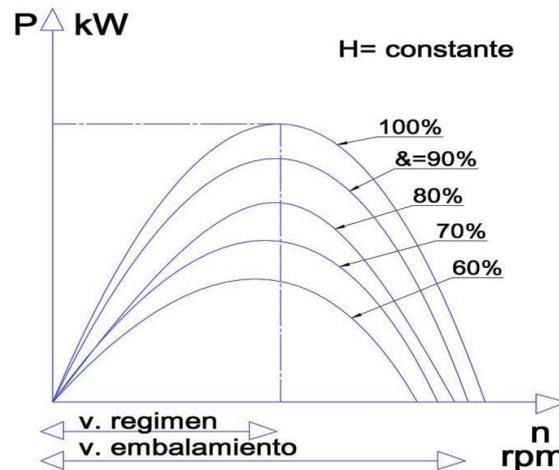
Los principales tipos de curvas características son los siguientes:

- **Curvas de potencia-velocidad**

Se trazan en función al grado de admisión, tomando un salto constante. Tienen forma parabólica y cortan al eje de las abscisas en dos puntos.

Un ejemplo de estas curvas se muestra en la figura:

**Figura 2.9. Curva de potencia-velocidad**



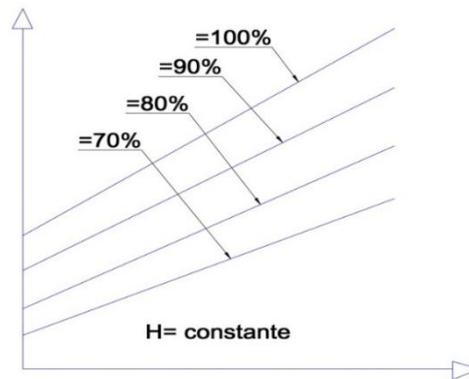
**Fuente: Tesis-Proyecto de una Minicentral Hidroeléctrica en el Embalse de Navacerrada- Mario Edmundo Muñoz merino.**

- **Curvas de caudal-velocidad**

Representan el caudal admitido por la turbina en función de su velocidad, para un salto constante y un grado de admisión variable.

Para las turbinas Pelton, estas gráficas son rectas horizontales; en las Francis lentas, son descendentes y en las Francis rápidas, son ascendentes. La figura 2.10. Muestra un ejemplo de estas curvas.

**Figura 2.10. Curva de caudal-velocidad**

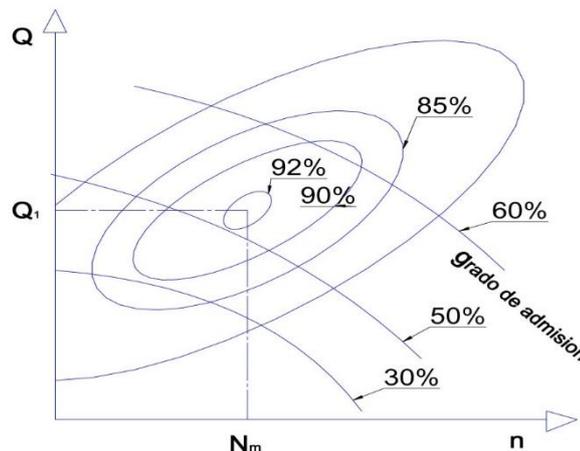


**Fuente: Tesis-Proyecto de una Minicentral Hidroeléctrica en el Embalse de Navacerrada- Mario Edmundo Muñoz merino.**

- **Curvas colina**

Son las resultantes de la unión de los puntos de igual rendimiento en unas condiciones variables de caudal y velocidad. Si se representara un tercer eje con la potencia, dichas curvas serían las denominadas curvas colina de rendimiento. En la Figura 2.11. Se muestra un ejemplo de estas curvas.

**Figura 2.11. Ejemplo de curvas de nivel**

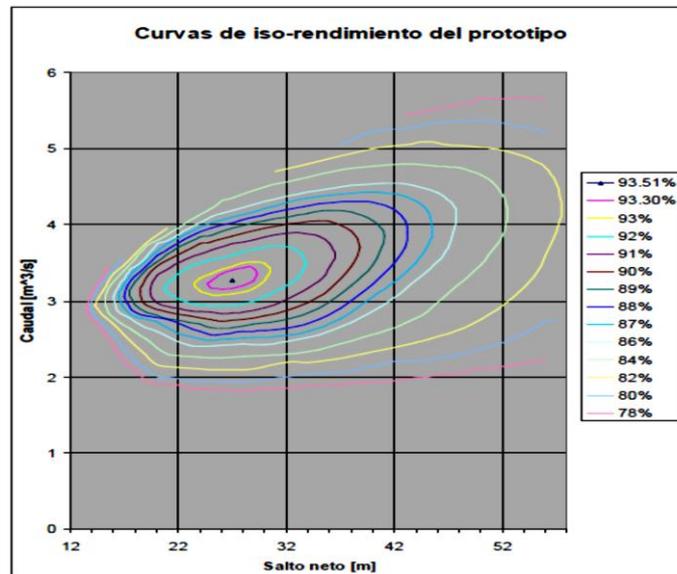


**Fuente: Tesis-Proyecto de una Minicentral Hidroeléctrica en el Embalse de Navacerrada- Mario Edmundo Muñoz merino.**

Para llevar a cabo el diseño de la turbina de este trabajo se llegaron a unas curvas colina de caudal frente a salto a partir de las conocidas de un modelo geoméricamente semejante.

El resultado de aplicar dicha semejanza se muestra en la Figura 2.12.

**Figura 2.12. Curvas colina de la turbina Kaplan**



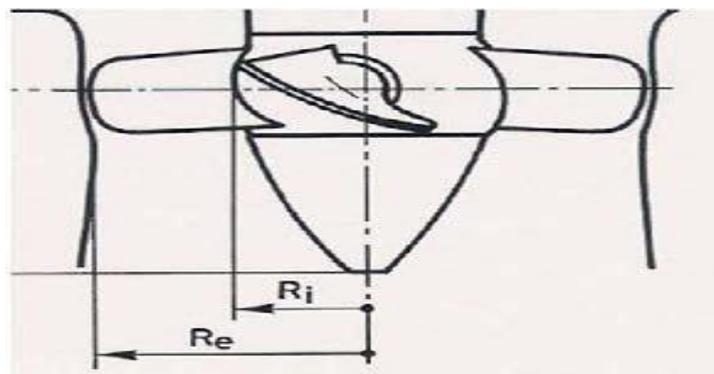
**Fuente: Tesis-Proyecto de una Minicentral Hidroeléctrica en el Embalse de Navacerrada- Mario Edmundo Muñoz merino.**

### 3.4.5. Dimensionamiento

- **DIMENSIONAMIENTO DE LA TURBINA**

Hallando los diámetros de la turbina

**Figura 2.13. Medidas en el rodete**



**Fuente: Oxyman Comercial SAC - Pequeña Central Hidroeléctrica del Hayco**

Diámetro de salida del rodete

Para determinar las dimensiones principales del rodete (Figura 2.12), el coeficiente de velocidad periférica está definido como:

$$\phi = D_M \pi N' / 60 \sqrt{2g H_d} \quad \text{ECU. (24)}$$

Donde:

$D_M$  = diámetro máximo

$N'$  = velocidad específica

$g$  = gravedad

$H_d$  = altura de salto neto

Y en función de  $N_s$  velocidad específica de la turbina con la siguiente fórmula:

$$\phi = 0.79 + 1.61 \cdot 10^{-3} N_s \quad \text{ECU. (25)}$$

$$N_s = 634.91$$

de la ECU. (23)

$$\phi = 1.81$$

- Velocidad síncrona de diseño - turbina  $N'$

$$N' = N'_s (P_t)^{-0.5} (H_d)^{1.25} \quad \text{ECU. (26)}$$

$$N' = 720$$

Calcular a la velocidad específica en el SISTEMA INTERNACIONAL

$$N_s = N (P_t)^{0.5} (H_d)^{-1.25} \quad \text{ECU. (27)}$$

$$N_s = 634.91 \text{ RPM}$$

dato hallado anteriormente en ECU. (23)

**DONDE:**

$N_s$  = velocidad específica en rpm

$N$  = velocidad angular o de rotación en rpm

$P_t$  = potencia de diseño de la turbina en kW

$H_d$  = carga de diseño de la turbina en m

**TABLA 10. Velocidad específica para turbinas tipo Hélice o Kaplan**

AÑO DE FABRICACIÓN	ECUACIÓN DE REGRESIÓN
1960 - 1964	$N'_s = 2096 H_d^{-0.489}$
1965 - 1969	$N'_s = 2195 H_d^{-0.489}$
1970 - 1976	$N'_s = 2419 H_d^{-0.489}$

**Fuente: Universidad Autónoma de México, facultad de ingeniería, selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas, Héctor García Gutiérrez – Arturo Nava Masteche, 2013 ,113 p.**

- Velocidad específica hallada con Kaplan por el año de fabricación (ecuación de regresión)

$$N'_s = 2419 H_d^{-0.489}$$

$$N'_s = 607.895 \text{ rpm}$$

*(Este dato, no es real o es de poca aproximación. En este caso lo hallamos y sólo nos sirve de guía para el diseño del dimensionamiento de la turbina y para aproximar a una velocidad constante y síncrona como **600 RPM**)*

$N'$  velocidad de rotación síncrona en rpm

Para un valor dado de la velocidad específica ( $N_s$ ), el diámetro de salida del rodete se puede calcular como:

$$D_M = 84.5 \phi \sqrt{H_d} / N' \quad \text{ECU. (28)}$$

$D_M = 0.99$  - metros

En la fase preliminar del proyecto, el diámetro exterior  $D_e$  se puede calcular con la fórmula:

$$D_e = 84,5 * (0,79 + 1,602 * \eta_{QE}) * \frac{\sqrt{H_n}}{60 * n} \quad \text{ECU. (29)}$$

$D_e = 0.988$  metros

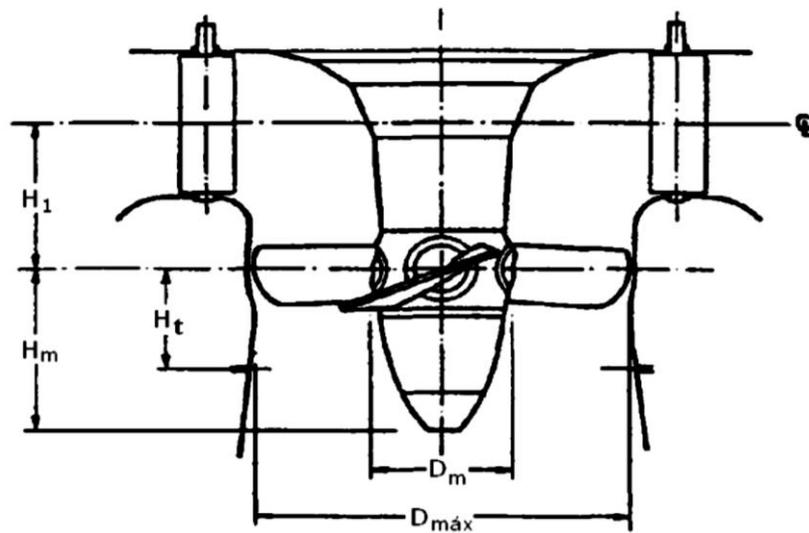
El diámetro ( $D_i$ ) del eje del rodete se calcula con la fórmula:

$$D_i = \left( 0,25 + \frac{0,0951}{\eta_{QE}} \right) * D_e \quad \text{ECU. (30)}$$

$D_i = 0.35$  metros

Las otras dimensiones del rodete (Figura 2.10):  $D_m$ ,  $H_m$ ,  $H_1$  y  $H_t$ , y sus funciones de interpolación se muestran en las siguientes fórmulas de dimensionamiento del rodete, expresiones respectivas en función de  $N_s$  y  $D_M$

**Figura 2.14. Dimensiones del rodete**



**Fuente: Guía para el Desarrollo de una Pequeña Central Hidroeléctrica ESHA-2006, Programa de Energía Inteligente para Europa (IEE) ,1998**

$$D_m/D_M = 0.25 + 94.64 / N_s ; \quad H_1/D_M = 0.38 + 5.17 \cdot 10^{-5} N_s$$

$$H_m/D_M = 6.94 (N_s)^{-0.403} ; \quad H_t/D_M = 0.24 + 7.82 \cdot 10^{-5} N_s$$

- Dm = 0.395 metros
- Hm = 0.5099 metros
- H1 = 0.40.9 metros
- Ht = 0.2896 metros

### **3.4.5.1. Dimensionamiento de la carcasa o caracol**

Los datos disponibles muestran que en el rango de velocidad específica de  $400 \leq N_s \leq 600$  aproximadamente, se puede adoptar la carcasa de acero o de concreto, dependiendo de las características particulares de la central hidroeléctrica. Este rango de  $N_s$  corresponde rigurosamente a cargas de diseño

( $Hd$ ) entre 15 y 35 m

- La carcasa de acero se recomienda para cargas  $H_d \leq 15$  m y potencia de diseño

$$P_t \geq 70 \text{ MW}$$

- La carcasa de concreto se utiliza para cargas de diseño  $H_d \geq 40$  metros y potencia de diseño

$$50 \leq P_t \leq 100 \text{ MW}$$

Lo anterior se puede decir que las carcasas de concreto operan con cargas mayores que las de acero y potencias del mismo rango.

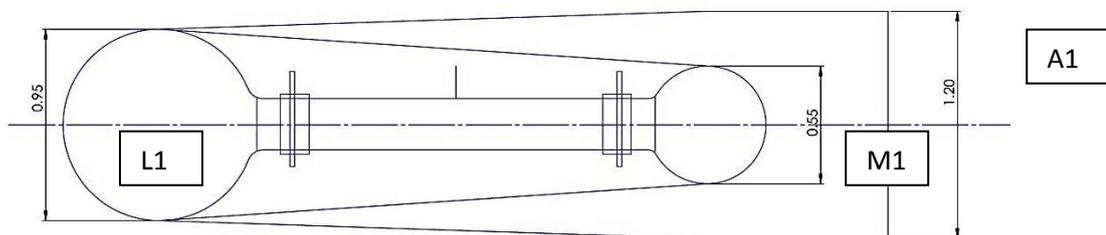
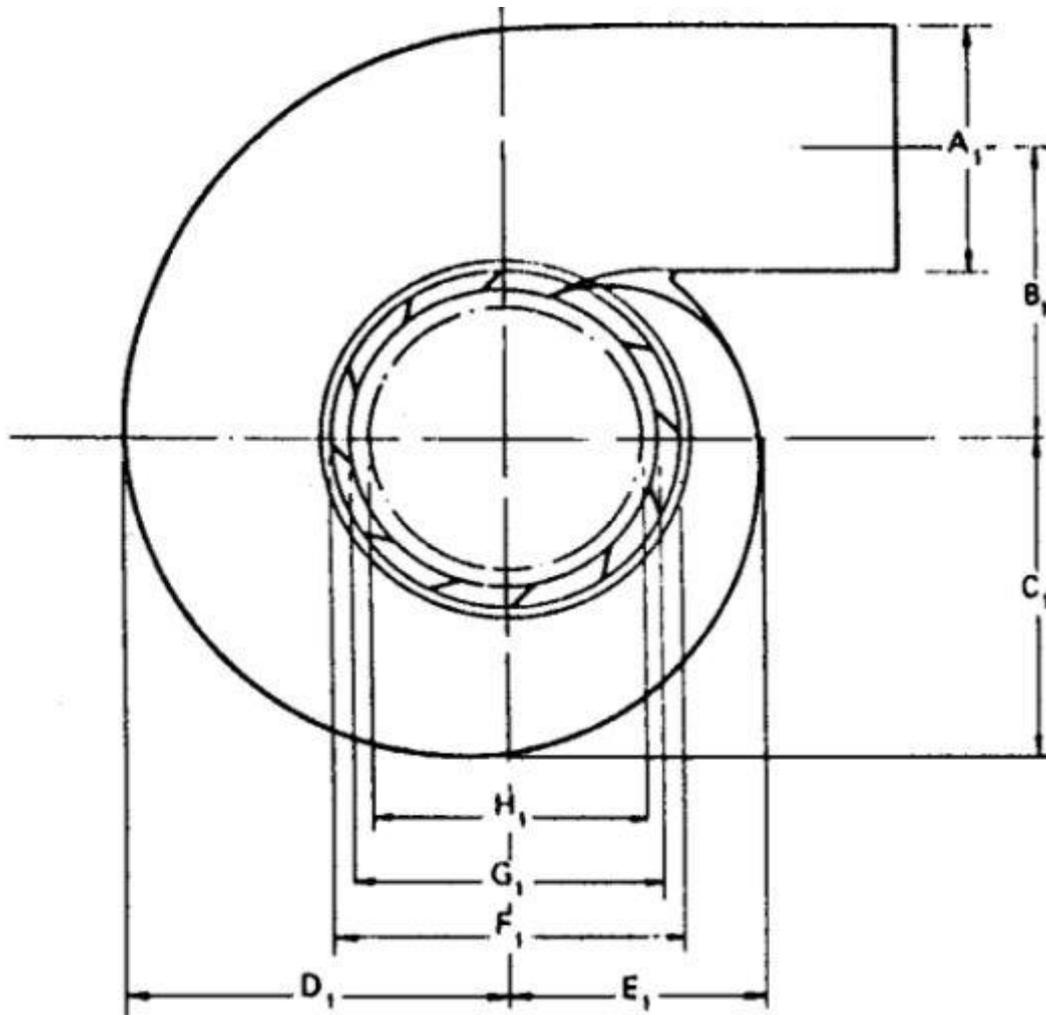
Las principales dimensiones de las carcasas de concreto y acero están dimensionadas con la teoría de semejanza, dichas fórmulas de interpolación están en función de la velocidad específica ( $N_s$ ) y porcentaje del diámetro de descarga (%  $DM$ ).

La carcasa de acero se recomienda para cargas

$$H_d \leq 15 \text{ m}$$

- **DIMENSIONAMIENTO DE LA CARCASA O CARACOL**

**Figura 2.15. Dimensiones de las carcasas**



**Fuente: Universidad Autónoma de México, facultad de ingeniería, selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas, Héctor García Gutiérrez – Arturo Nava Masteche, 2013 ,113 p.**

Carcaza de acero

$$A_1 / D_M = 0.40 N_s^{0.20}$$

$$B_1 / D_M = 1.26 + 3.79 (10)^{-4} N_s$$

$$C_1 / D_M = 1.46 + 3.24 (10)^{-4} N_s$$

$$D_1 / D_M = 1.59 + 5.74 (10)^{-4} N_s$$

$$E_1 / D_M = 1.21 + 2.71 (10)^{-4} N_s$$

$$F_1 / D_M = 1.45 + 72.17 / N_s$$

$$G_1 / D_M = 1.29 + 41.63 / N_s$$

$$H_1 / D_M = 1.13 + 31.86 / N_s$$

$$I_1 / D_M = 0.45 - 31.80 / N_s$$

$$L_1 / D_M = 0.74 + 8.7 \cdot 10^{-4} N_s$$

$$M_1 / D_M = 1 / (2.06 - 1.20 \cdot 10^{-3} N_s)$$

$$A_1=1.44$$

$$B_1=1.487$$

$$C_1=1.649$$

$$D_1=1.935$$

$$E_1=1.37$$

$$F_1=1.55$$

$$G_1=1.342$$

$$H_1=1.17$$

$$I_1=0.396$$

$$L_1=1.28$$

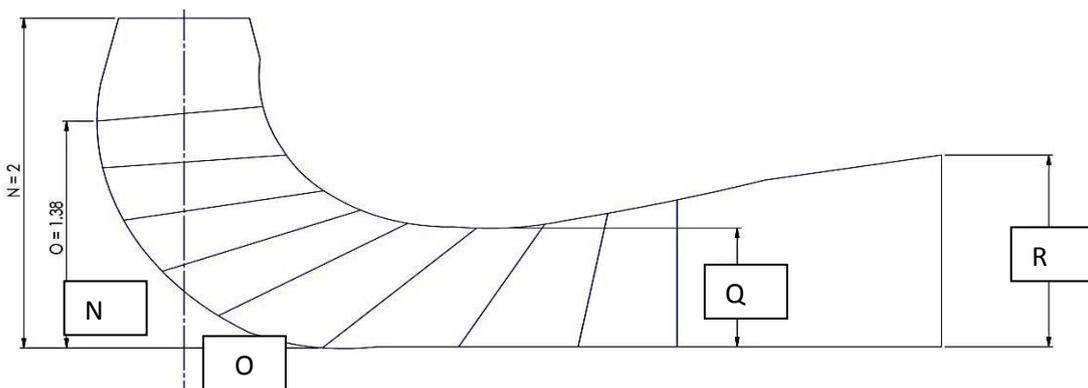
$$M_1=0.763$$

### 3.4.5.2. Dimensionamiento del tubo de aspiración

También conocido como difusor, tiene la función de crear una depresión que permita recuperar energía cinética del agua y así incrementar la altura geométrica del salto en una distancia igual a la existente en el rodete y el nivel del canal de salida.

Un difusor bien diseñado permitirá instalar la turbina por encima del nivel del canal de salida, sin perder prácticamente altura de salto; aumenta progresivamente su sección para disminuir la velocidad del agua y limitar las pérdidas, de manera que su perfil es cónico. El ángulo de conicidad no debe superar los 7 grados para evitar que el flujo se despegue de las paredes del tubo. Sin embargo, los ángulos de conicidad bajos requieren que el tubo sea muy largo, por lo que se emplean conicidades próximas a los 15 grados.

**Figura 2.16. Dimensiones del difusor**



**Fuente: Universidad Autónoma de México, facultad de ingeniería, selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas, Héctor García Gutiérrez – Arturo Nava Masteche, 2013 ,113 p.**

$$Ht / D_M = 0.24 + 7.82 \cdot 10^{-5} N_s$$

$$N / D_M = 2.00 - 2.14 \cdot 10^{-6} N_s$$

$$O / D_M = 1.40 - 1.67 \cdot 10^{-5} N_s$$

$$P / D_M = 1.26 - 16.35 / N_s$$

$$Q / D_M = 0.66 - 18.40 / N_s$$

$$R / D_M = 1.25 - 7.98 \cdot 10^{-5} N_s$$

$$S / D_M = 4.26 + 201.51 / N_s$$

$$T / D_M = 1.20 + 5.12 \cdot 10^{-4} N_s$$

$$Z / D_M = 2.58 + 102.66 / N_s$$

$$U / D_M = 0.15$$

$$V / D_M = 2.91$$

**DONDE:**

$$O = 1.38$$

$$N = 2.00$$

$$MI = 0.55$$

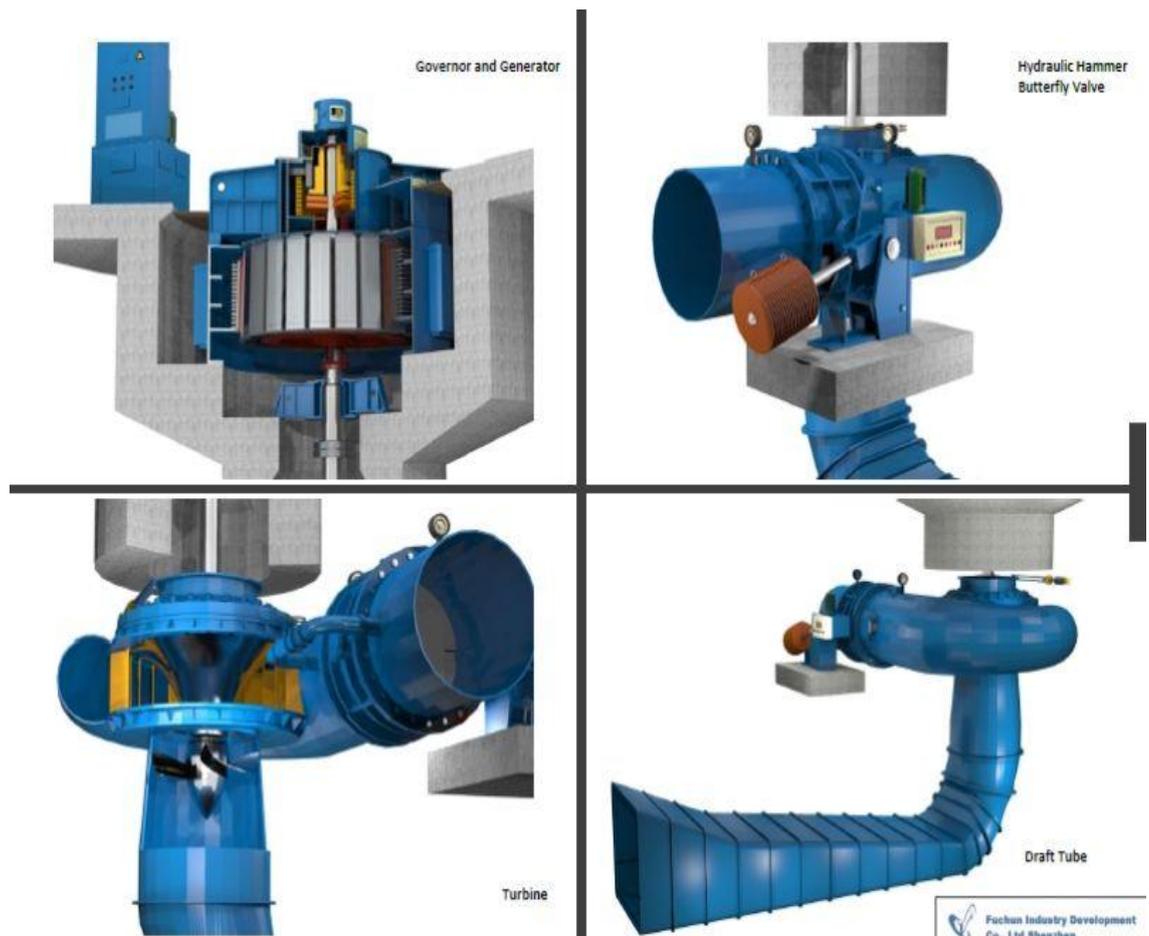
$$A1 = 1.20$$

$$R = 1.20$$

$$Q = 0.63$$

$$L1 = 0.95$$

**Figura 2.17. Kaplan dimensionada - turbina**

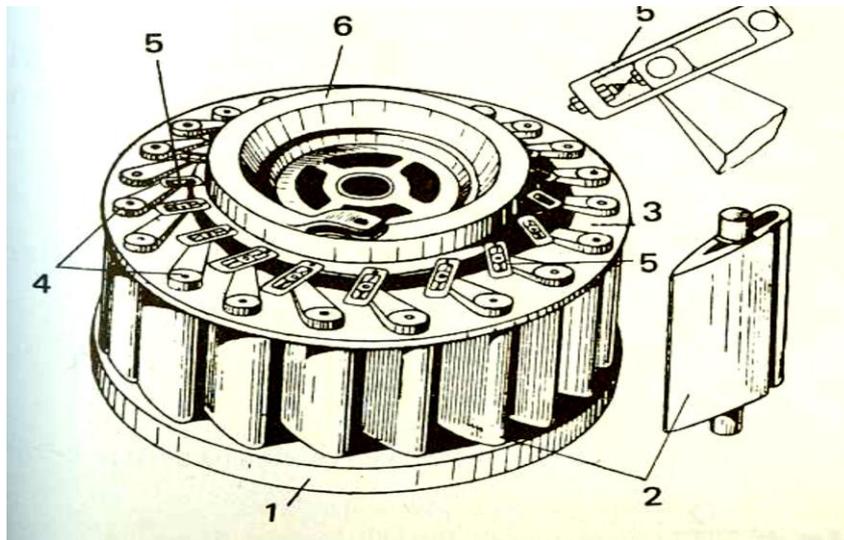


**Fuente: Oxyman Comercial SAC – Pequeña Central  
Hidroeléctrica de El Huayco**

### 3.4.6. Distribuidor Fink

Se trata de un dispositivo de alabes giratorios que se emplea para regular el caudal y la forma en que este llega al rodete. Consta de un servomotor hidráulico que mueve un anillo giratorio, que a su vez permite el giro de los alabes (Figura 2.18.).

**Figura 2.18. Detalle del distribuidor Fink**

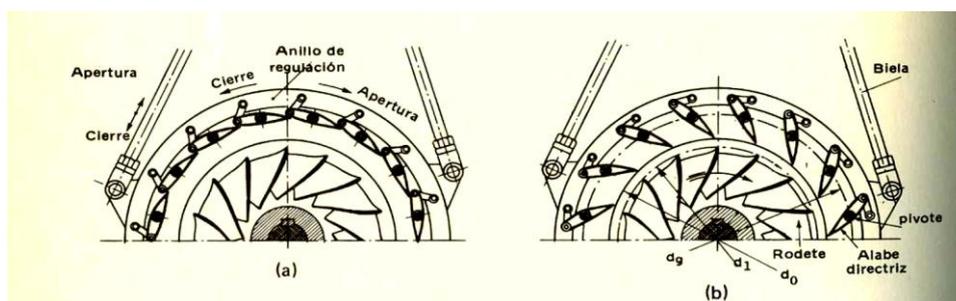


**Fuente: Universidad Pontificia Comillas , Escuela Técnica Ingeniería (ICAI), Ingeniería Industrial , Proyecto Fin de Carrera, Diseño Hidráulico y Mecánico de la Central Minihidroeléctrica del Embalse de Valmayor ; Julián Martín de Eugenio Poza – Madrid junio 2008**

El servomotor acciona un brazo de carrera amortiguada para absorber los golpes de ariete.

En la Figura 2.19. Se muestra el funcionamiento de un distribuidor; concretamente en sus posiciones extremas, completamente abierto y completamente cerrado.

**Figura 2.19. Funcionamiento del distribuidor Fink**



**Fuente: Universidad Pontificia Comillas , Escuela Técnica Ingeniería (ICAI), Ingeniería Industrial , Proyecto Fin de Carrera, Diseño Hidráulico y Mecánico de la Central Minihidroeléctrica del Embalse de Valmayor ; Julián Martín de Eugenio Poza – Madrid junio 2008**

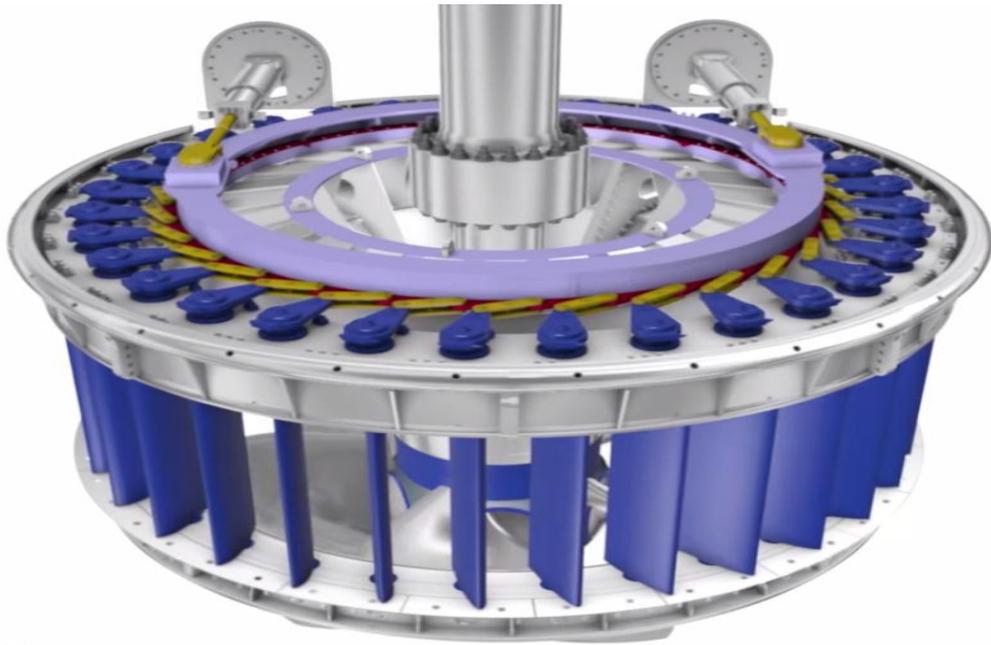
#### **a) Distribuidor cerrado y abierto**

En la posición de cierre, los alabes se apoyan entre sí; de manera que impiden prácticamente el paso del agua al rodete. De esta forma, se puede parar la central evitando embalamientos.

Los perfiles de los alabes son superficies desarrollables cilíndricas de generatrices paralelas al eje de rotación de la turbina. Se pretende que no haya transformación de energía cinética o mecánica en ellos, porque sería una pérdida más que reduciría el rendimiento de la turbina y además se crearían esfuerzos en el distribuidor, no deseado.

Sus elementos se fabrican en acero. El bulón que une la biela con el alabe trabaja a cortadura y ha de diseñarse para que rompa en caso de entrar un objeto extraño en la maquinaria. De esta forma, se evita que se rompan componentes más costosos del distribuidor (Figura 2.20).

**Figura 2.20. Distribuidor Fink - 3D**



**Fuente: Oxyman Comercial SAC – Pequeña Central  
Hidroeléctrica de El Huayco**

➤ **Cierres laberínticos**

Se diseñan para minimizar las pérdidas de agua que tienen lugar en la turbina. Estas pérdidas pueden ser de dos tipos:

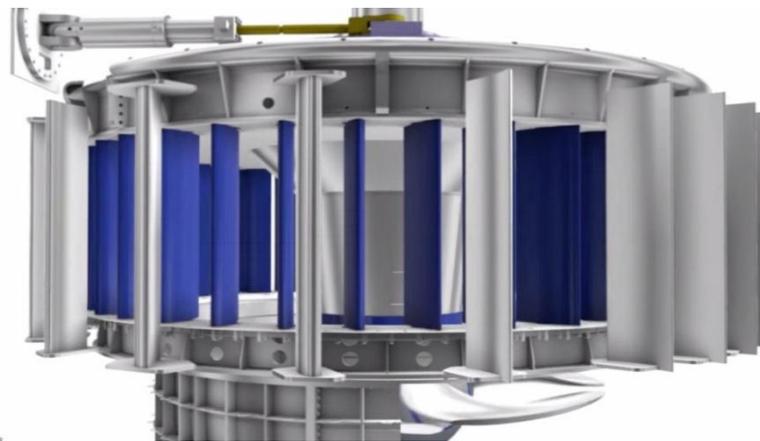
- Pérdidas de cortocircuito: Se deben al flujo que circula por el intersticio entre la carcasa y el rodete en el sentido del resto del flujo entrante. Al no llegar a los alabes del rodete, no se produce intercambio de energía y genera un descenso en el rendimiento.

- Pérdidas al exterior: Es el caudal que sale hacia el exterior de la carcasa, por lo que su salida no es junto al flujo principal, como ocurría en las pérdidas de cortocircuito.

Los cierres laberínticos o hidráulicos buscan minimizar las pérdidas de fuga, incrementando la resistencia que el agua debe vencer para salir.

Generan una resistencia de superficie al alargar el recorrido y una resistencia de forma al intrincarlo. Estos cierres constan de dos anillos de desgaste, uno en la carcasa y otro en el rodete. Se roscan en sentido contrario al giro para que no se aflojen con el tiempo.

**Figura 2.21. Distribuidor fink abierto**



**Fuente: Oxyman Comercial SAC – Pequeña Central  
Hidroeléctrica de El Huayco**

#### **3.4.7. Multiplicadores de velocidad**

En general, sobre todo en instalaciones de baja altura de salto, los rodetes giran por debajo de 400 rpm, lo que obliga al empleo de un multiplicador para alcanzar las 1.000- 1.500 rpm de los alternadores estándar; solución siempre más económica que la de utilizar un alternador especial, que tendrá que ser construido bajo pedido. Actualmente, los fabricantes de generadores, ofrecen a precios razonables generadores lentos que pueden ser acoplados directamente.

## Diseño de multiplicadores

La caja se diseña para garantizar, aun bajo solicitaciones extremas, la correcta alineación de los componentes. En general, se construyen de acero soldado, fuertemente rigidizado para que pueda resistir sin deformarse el empuje de la turbina y el par transmitido por el generador.

El reductor tiene que soportar esfuerzos excepcionales, causados por situaciones excepcionales, tales como un defecto de sincronismo, un cortocircuito o un embalamiento de la turbina, que generan esfuerzos puntuales que pueden llegar a romper los engranajes. Para proteger los engranajes contra estos esfuerzos puntuales, se recomienda utilizar limitadores de par que al presentarse una sobrecarga excesiva originan la rotura de la pieza que hace de acoplamiento.

Es importante que el volumen, calidad, temperatura y viscosidad del aceite se mantengan siempre dentro de las especificaciones. Para garantizar una buena lubricación es aconsejable utilizar doble bomba y doble filtro de aceite.

Los multiplicadores se diseñan con arreglo a normas (AGMA 2001, B88 o DIN 3990), pero utilizando criterios conservadores en la evaluación de los esfuerzos. Estos criterios entran en conflicto con la necesidad de reducir costos; pero para encontrar el equilibrio entre fiabilidad y precio, hay que tener muy claras las ideas sobre cómo se dimensionan los componentes. Un buen conocimiento de las cargas de fatiga y una gran precisión en el tallado de engranajes, son condiciones indispensables para garantizar la durabilidad de un multiplicador.

Los factores metalúrgicos juegan también un papel importante. En cada caso hay que estudiar las ventajas respectivas de la nitruración y de la cementación, muy en particular en lo que respecta a los esfuerzos permisibles en el contacto de los dientes.

La elección de los cojinetes es crucial para el diseño del multiplicador. Por debajo de 1MW pueden utilizarse rodamientos de rodillos. Sin embargo, para mayores potencias resulta difícil encontrar rodamientos con una garantía de vida aceptable, por lo que a partir de esa potencia se utilizan cojinetes hidrodinámicos.

Efectivamente, la vida de los rodillos está limitada por el fenómeno de fatiga, mientras que los hidrodinámicos tienen una vida prácticamente ilimitada. Los cojinetes hidrodinámicos, por otra parte, admiten una cierta contaminación del aceite, cosa que no es tolerada por los rodillos.

### 3.4.8. Selección de la velocidad de embalamiento

La tabla muestra la relación entre la velocidad de embalamiento y la normal de rotación.

**TABLA 11. Relación entre velocidad de rotación y de embalamiento**

<b>Tipo de turbina</b>	<b><math>n_{max} / n</math></b>
<b>Kaplan simple regulación</b>	<b>2,0 – 2,6</b>
<b>Kaplan doble regulación</b>	<b>2,8 – 3,2</b>
<b>Francis</b>	<b>1,6 – 2,2</b>
<b>Pelton</b>	<b>1,8 – 1,9</b>
<b>Turgo</b>	<b>1,8 – 1,9</b>

**Fuente: Guía para el Desarrollo de una Pequeña Central Hidroeléctrica ESHA-2006, Programa de Energía Inteligente para Europa (IEE) ,1998**

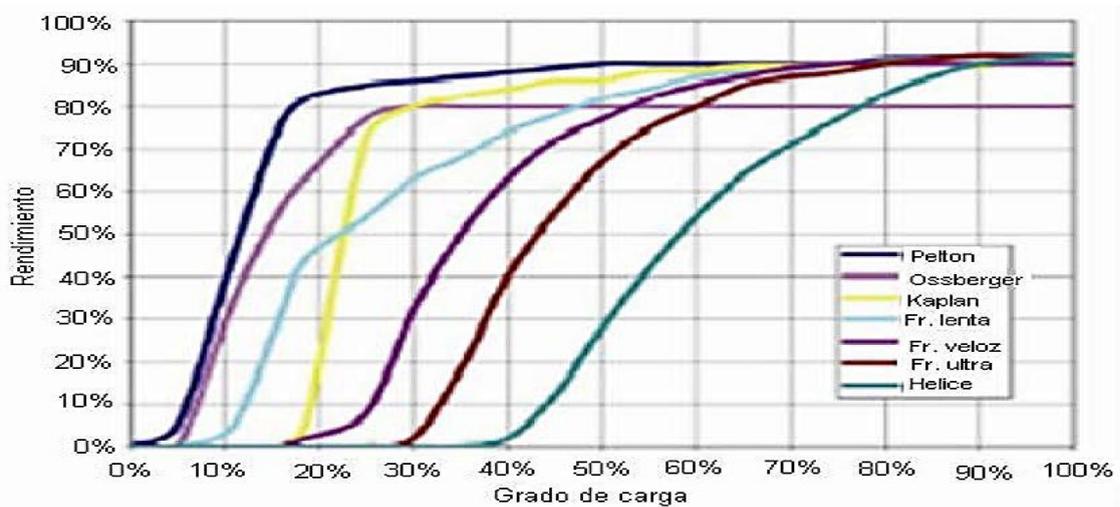
Hay que tener en cuenta que al aumentar la velocidad de embalamiento, se encarecen el multiplicador y el generador, que habrán de diseñarse para poder resistir las fuerzas de aceleración centrífuga correspondientes

### 3.4.9. Rendimiento de la turbina

Como sucede en todas las máquinas, durante el funcionamiento de las turbinas se producen pérdidas de energía que determinan el rendimiento de aquellas; las principales causas que producen estas pérdidas son:

- Rozamiento del agua con el distribuidor
- Pérdidas en el rodete producidas por el choque de entrada y por el cambio brusco de velocidad de los filetes de agua que salen del distribuidor y chocan con los bordes de los alabes del rodete.
- Rozamiento de agua con el tubo de aspiración.
- Distancia que hay entre el distribuidor y el rodete, por donde se escapa una pared de agua
- Resistencias pasivas en los cojinetes

**TABLA 12. Rendimiento de la Turbina**



**Fuente: Dimensionamiento de una microcentral hidroeléctrica, Maira ginet Rodríguez Pedraza - Fredy Aldemar Torres Ferreira , Universidad Industrial de Santander / Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas - Escuela de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones; Bucaramanga 2016**

### 3.4.10. Cálculos para hallar la cavitación

Cuando la presión ejercida sobre un líquido en movimiento, desciende por debajo de su presión de vaporización, este se evapora formando gran número de pequeñas burbujas, que al ser arrastradas a zonas de mayor presión, terminan por estallar. La formación de estas burbujas y su subsiguiente estallido, es lo que constituye la cavitación. La experiencia demuestra que el estallido de esas burbujas genera impulsos de presión muy elevados, que van acompañados de fuertes ruidos (una turbina en cavitación suena como si a través de ella pasasen montones de grava), y que la acción repetitiva de esos impulsos produce una especie de corrosión difusa, formando picaduras en el metal (pitting<sup>22</sup>). Con el tiempo, esas picaduras degeneran en verdaderas grietas con arrancamiento de metal.

Las elevadas temperaturas generadas por esos impulsos y la presencia frecuente de gases ricos en oxígeno, agravan la corrosión. Un alabe sometido a cavitación aparece al cabo de cierto tiempo lleno de cavidades, lo que obliga a sustituirlo o, si aún se está a tiempo, a repararlo recargándolo por soldadura. Para evitarla habrá que realizar ensayos de laboratorio, para definir el perfil correcto de los alabes y determinar el campo de operatividad de la turbina.

La cavitación viene caracterizada por un coeficiente  $\sigma$  (coeficiente de Thoma), definido según la norma IEC 60193 como:

$$\sigma = \frac{NPSE}{gH_n}$$

ECU. (31)

---

<sup>22</sup> Pitting : es una forma de corrosión localizado y caracterizado por los agujero en el metal, es peligrosa y dañina.

En la que NPSE, energía neta de succión positiva, está definida como:

$$NPSE = \frac{P_{atm} - P_v}{\rho} + \frac{V^2}{2} - gH_s \quad \text{ECU. (32)}$$

**DONDE:**

$P_{atm}$  = presión atmosférica [Pa]

$P_v$  = presión del vapor de agua [Pa]

$\rho$  = densidad específica del agua [kg/m<sup>3</sup>]

$g$  = aceleración debida a la gravedad [m/s<sup>2</sup>]

$V$  = velocidad media de salida [m/s]

$H_n$  = altura de salto neta [m]

$H_s$  = altura de succión [m]

$g=$	9.81
$P_{atm}=$	75600
$P_v=$	880
$V=$	26.31
$\rho=$	1000
$H_n=$	16.85
$\sigma =$	0.64
$V=$	26.31

Para evitar la cavitación, la turbina debe instalarse a una altura al menos igual a  $H_s$  definida por la ecuación 33:

$$H_s = \frac{P_{atm} - P_v}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} - \sigma H_n \quad \text{[m] ECU. (33)}$$

Un valor positivo de  $H_s$  significa que el rotor de la turbina estará situado por encima del nivel del agua en el canal de retorno y uno negativo que está situado bajo el agua.

Como primera aproximación se puede considerar que  $V = 26.31\text{m/s}$

El sigma de una turbina es una función de su velocidad específica y el proyectista deberá solicitarla del fabricante, que la obtendrá a partir de ensayos en laboratorio con modelos reducidos. De todos modos, De Servio y Lugaresi, basándose en los citados estudios estadísticos, establecieron para las turbinas Francis y Kaplan, la siguiente correlación entre  $\sigma$  y velocidad específica:

$$\text{Francis} \quad \sigma = 1,2715 * \eta_{QE}^{1,41} + \frac{V^2}{2gH_n}$$

$$\text{Kaplan} \quad \sigma = 1,5241 * \eta_{QE}^{1,46} + \frac{V^2}{2gH_n}$$

ECU. (34)

**DONDE:**

$$n_{QE} = 0.64 = \sigma \quad \text{hallado en ECU. (22)}$$

V = velocidad, como primera aproximación se puede considerar 26.31 m/s

**OBTENIENDO:**  $\sigma = 0.64$

La ecuación 35 muestra la concordancia entre velocidad específica y sigma de cavitación:

$$n_{QE} \leq 0.637 * \sigma^{0.5882} \quad \text{ECU. (35)}$$

$$0.48 \leq n_{QE} \leq$$

Dando en si que se produciría cavitación en la espiral de la turbina.

Para evitar esa cavitación se recomienda usar la ecuación 34

El valor positivo de Hs significa que el rotor de la turbina está situado por encima del agua en el canal de retorno y uno negativo estará situado bajo el agua

Hs = -1.83m estará situado bajo el agua.

Exigirá una excavación

### ***NPSH***<sup>23</sup>

En hidráulica, la **NPSH** (acrónimo de **Net Positive Suction Head**), también conocido como ANPA (Altura Neta Positiva en la Aspiración) y CNPA (Carga Neta Positiva en Aspiración), es una cantidad utilizada en el análisis de la cavitación de una instalación hidráulica.

- **NPSH disponible**: es una medida de cómo de cerca está el fluido de la cavitación.
- **NPSH requerido**: valor límite requerido, en cierto punto de la instalación, para evitar que el fluido entre en cavitación.  
(Anexo 5 Propiedades físicas del agua)

### **NPSH requerida**

La **NPSH requerida** es la NPSH mínima que se necesita para evitar la cavitación. Depende de las características de la bomba, por lo que es un dato que debe proporcionar el fabricante en sus curvas de operación.

$$NPSH_r = H_z + \frac{V^2}{2g} \quad \text{ECU. (34)}$$

**Donde:**

**H<sub>z</sub>** es la altura mínima necesaria a la entrada del rodete, en m.c.l. (metros de columna de líquido).

$\frac{V^2}{2g}$  es la presión cinética correspondiente a la velocidad de entrada del líquido en la boca de aspiración, en m.c.a. (para V<sub>a</sub> en m/s).

$$NPSH_r = 52.14 \text{ metros}$$

### **NPSH disponible**

La **NPSH disponible** es una medida de qué tan cerca está el fluido de la cavitación. Esta cantidad depende de las características de la instalación y del líquido a bombear. La NPSH disponible es igual a la altura hidráulica total que tiene el fluido a

<sup>23</sup> <https://es.wikipedia.org/wiki/NPSH>

la entrada de la bomba, menos la presión de vapor, menos la altura geométrica de aspiración.

$$NPSHd = \frac{P_E}{\gamma} + \frac{V_E^2}{2g} - \frac{P_v}{\gamma} \quad \text{ECU. (34)}$$

Donde:

$\gamma$  = es el peso específico del líquido (N/m<sup>3</sup>).

$P_E$  = es la presión absoluta a la entrada de la bomba ( $P_a$ ).

$V_E$  = es la velocidad a la entrada de la bomba (m/s).

$P_v$  = la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo ( $P_a$ ).

$g$  = gravedad

La fórmula de Pascal

$$P_e = \gamma * g * h$$

Donde:

$P_e$  = peso específico del líquido

$h$  = la profundidad desde el fondo del recipiente hasta la superficie del líquido

***NPSHd= 163.032 metros***

$$\mathbf{NPSHd < NPSHr}$$

La NPSH disponible debe ser mayor que la NPSH requerida para evitar la cavitación

### **3.4.11. Control de la turbina**

Las turbinas se diseñan para una altura de salto y un caudal predeterminados. Cualquier variación de estos parámetros debe compensarse abriendo o cerrando los dispositivos de control del caudal, tales como alabes directrices, válvulas o compuertas; a fin de mantener constante, ya sea la potencia de salida a la red, el nivel de la lámina de agua en la toma o el caudal que atraviesa la turbina.

En aprovechamientos que suministran energía a una red aislada, el parámetro a controlar es la velocidad del rodete,

relacionado directamente con la frecuencia. En principio, existen dos enfoques para regular la velocidad de estos grupos: variar el caudal de entrada a la turbina o disipar el exceso de potencia eléctrica en bancos de resistencias. Al aumentar la demanda de energía, el generador se sobrecarga y frena la turbina.

En el primer enfoque, la regulación de la velocidad (frecuencia) se logra variando el caudal que entra a la turbina. Un sensor, mecánico o electrónico detecta la variación de velocidad y manda a un servomotor que modifique la apertura de los alabes del distribuidor (y eventualmente del rodete) de forma que admita más agua; por ende, más potencia hidráulica, a fin que la turbina pueda satisfacer el incremento de la demanda. Del mismo modo, al disminuir la carga, la turbina se acelera y el sensor envía una señal de signo contrario para cerrar los alabes del distribuidor. Estos aparatos se conocen bajo el nombre de *reguladores de velocidad*.

En el segundo enfoque, la turbina funciona con caudal constante y genera una potencia eléctrica constante. Si el sistema demanda menos energía, la turbina tiende a embalsarse; un sensor electrónico detecta el aumento de frecuencia y un dispositivo, conocido como controlador de carga, procede a disipar el exceso de energía en un banco de resistencias, manteniendo constante la demanda.

Los reguladores que trabajan con arreglo al primer enfoque, se construyen para toda la gama de potencias. Inicialmente, fueron concebidos para grandes turbinas y luego rediseñados para las turbinas pequeñas. Los que trabajan con el segundo enfoque, raramente sobrepasan el techo de los 100 kW

#### **a) Reguladores de velocidad**

Datos importantes: trabajamos según la ley de semejanzas; optamos por tomar ejemplos de turbinas Kaplan y

Francis instaladas en el mundo, asemejándonos así a la potencia con las que fueron instaladas y usando de ejemplo su regulador instalado

Un regulador de velocidad consta en esencia de un sensor que detecta cualquier desviación de la velocidad con respecto al punto de consigna y un dispositivo que amplifica la señal transmitida por el sensor, para que ordene a un servomotor que accione los mecanismos que controlan el paso del agua a la turbina, manteniendo constante la velocidad y, por tanto, la frecuencia. En una turbina Francis, en la que se puede cortar el paso del agua cerrando los alabes del distribuidor, los mecanismos del servomotor tienen que ser muy robustos (Figura 2.18), para poder vencer la reacción del agua y los rozamientos mecánicos en los ejes, y para mantener cerrados los alabes del distribuidor.

Los reguladores pueden ser mecánicos, mecano-hidráulicos o electro-hidráulicos, según la precisión y sofisticación que se desee. Los mecánicos solo se utilizan en turbinas de algunos kilovatios de potencia, utilizando un centrífugo de bolas pesadas (Figura 2.19) que actúan directamente sobre el distribuidor. En los mecano-hidráulicos se utiliza un centrífugo de bolas convencionales actuando sobre un servomotor. Cuando, al aumentar la carga, la velocidad de la turbina disminuye, las bolas giran más despacio y caen, desplazando la posición del pistón en la válvula piloto, para enviar el aceite a presión a la cámara superior del cilindro.

El pistón desplaza una varilla que actúa sobre el mecanismo de los alabes del distribuidor, aumentando o reduciendo la velocidad de la turbina en un regulador electro-hidráulico. Un sensor electrónico mide permanentemente la frecuencia (y eventualmente la tensión) y transmite la señal a un «sumidero» en el que se la compara con el valor de

consigna. Si la señal transmitida por el sensor difiere de la de consigna, el sumidero emite una señal de error (positiva o negativa), que una vez amplificada es enviada al servomotor para que actúe en el sentido deseado.

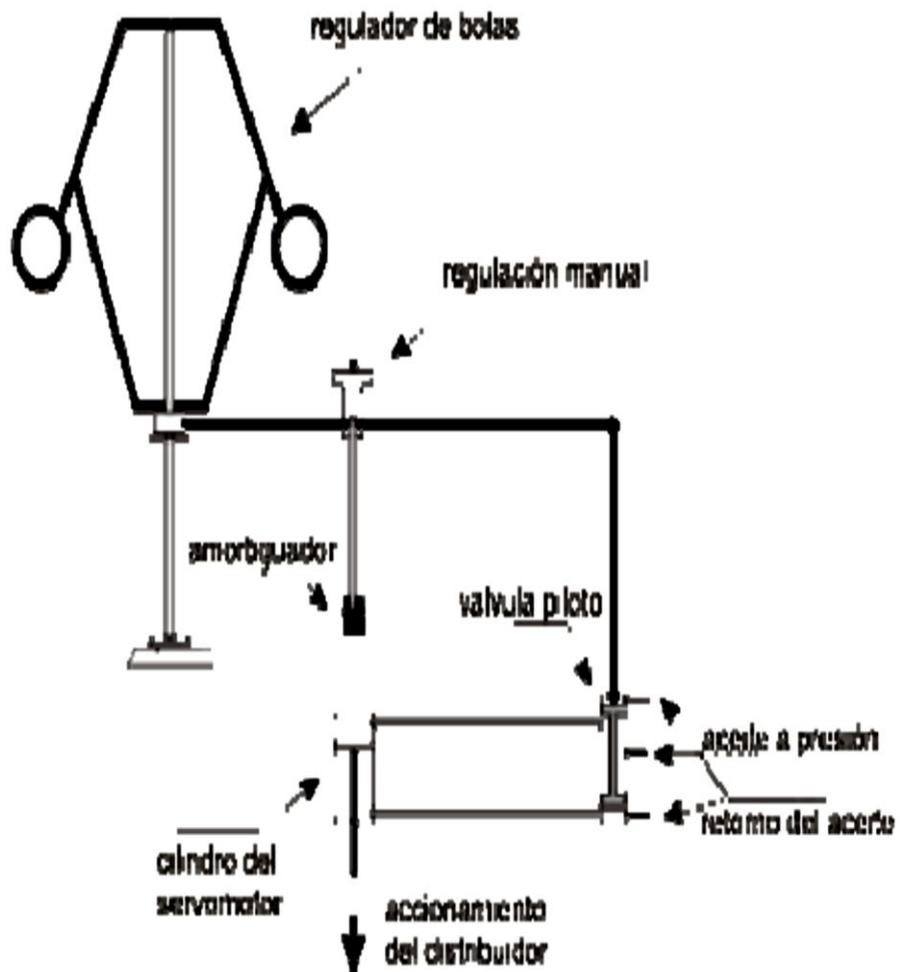
**Figura 2.22. Central hidráulica para el servomotor**



**Fuente: UNS. Energía Hidráulica – Ing. Amancio P. Rojas Flores**

Por un motor eléctrico que suministra aceite a presión al sistema, un acumulador de aceite a presión y las válvulas de control. Todos estos mecanismos actúan por acción y reacción, corrigiendo en uno u otro sentido la posición del distribuidor, lo que provoca una cierta inestabilidad en el grupo. En los sistemas mecano-hidráulicos, eso se corrige intercalando un amortiguador hidráulico (ver figura 2.22) que retarda la apertura de la válvula piloto. En los sistemas electro-hidráulicos, se llega a un grado de sofisticación muy superior, de forma que la corrección, que puede ser proporcional, integral o derivativa (PID), da lugar a un mínimo de variación en el proceso de regulación.

**Figura 2.23. Regulador de bolas y servomotor**



**Fuente: Guía para el Desarrollo de una Pequeña Central Hidroeléctrica ESHA-2006, Programa de Energía Inteligente para Europa (IEE) ,1998**

Un generador asíncrono conectado a una red eléctrica estable no necesita controlador, porque su frecuencia está determinada por la red. Sin embargo cuando, por alguna causa, el generador se desconecta de la red, la turbina se embala. Tanto el multiplicador como el generador se deben diseñar para que soporten este incremento de velocidad durante un cierto tiempo, hasta que se cierre la válvula de entrada a la turbina, por los mecanismos de control correspondientes.

Para controlar la velocidad de la turbina regulando la admisión de agua, se necesita que los componentes rotativos tengan una determinada inercia. Esta inercia adicional se consigue acoplado un volante al eje de la turbina. Cuando se abre el interruptor que conecta el generador a la red, la potencia disponible acelera el volante; de modo que al volver a conectar la energía disponible en el volante, minimiza la variación de velocidad.

### b) Características del gobernador de velocidad hidráulico<sup>24</sup>

PLC del gobernador de la turbina con la capacidad nanómetro 3000/75000 para turbina de agua. Este gobernador diseñado sobre tecnología hidráulica y el PLC controlan tecnología, alcanzan la regulación automática de la turbina hidráulica y la controlan.

FUNCIÓN: regular la velocidad de la turbina, ajusta la frecuencia del sistema de generador, ajusta la frecuencia de la red de la fuente de alimentación y controla las fases.

**Cuadro 2. GOBERNADOR DE VELOCIDAD A INSTALAR**

Gobernador de velocidad			
	Modelo:	GLYWT— 1800	16
01	Aceite de masaje (presión de aceite):	16	Mpa
02	Salida de la unidad	<b>996</b>	kW

**Fuente: cotización 1- anexo 4**

<sup>24</sup> Datos proporcionados por productores

### **3.4.12. Caudal ecológico**

Tiene que mantener un adecuado hábitat, temperatura, oxígeno disuelto y química para los organismos acuáticos; agua bebible para animales terrestres y humedad de suelos para las plantas. La determinación del caudal ecológico se enfoca en la época seca y la época de humedad, ya que se considera un superávit de agua al ecosistema en la época de lluvias. Se deben estimar los caudales promedios en la época seca y época de humedad en la zona de estudio, que asemejen las condiciones iniciales de la cuenca antes de ser manipuladas por represas y canales de derivación.

### **3.4.13. Marco legal en Perú**

La Ley 29338, Ley de Recursos Hídricos, regula no solo el uso del agua como un recurso; sino también los bienes asociados a él. La ley considera que el agua es parte integrante de los ecosistemas.

El reglamento de la Ley es el Decreto Supremo N° 001-2010-AG. El Artículo 153 define al caudal ecológico como el flujo de agua “que se debe mantener en las fuentes naturales de agua para la protección o conservación de los ecosistemas involucrados, la estética del paisaje u otros aspectos de interés científico o cultural”.

Asimismo, el Artículo 155 determina que la metodología del cálculo del Caudal Ecológico será establecida por la Autoridad Nacional del Agua en coordinación con el Ministerio del Ambiente y participación de las autoridades sectoriales competentes.

#### **a) Análisis**

El cálculo del caudal ecológico se puede realizar mediante:

- Modelamiento hidrológico distribuido: Cálculo más preciso y más complejo. Toma en cuenta la distribución de la

temperatura y precipitación. Puede predecir impactos de cambio climático y cambio; ser calibrado con valores de la cuenca y subcuencas.

- Modelamiento hidrológico totales (“lump”): Cálculo más sencillo y rápido, solo puede ser calibrado sobre una cuenca. No toma en cuenta distribuciones de temperatura y precipitación.
- Metodologías aprobadas por los organismos supervisores: Las agencias reguladoras (ANA y MINAM) pueden establecer sus propias metodologías.

#### **b) Metodología en discusión por la ANA**

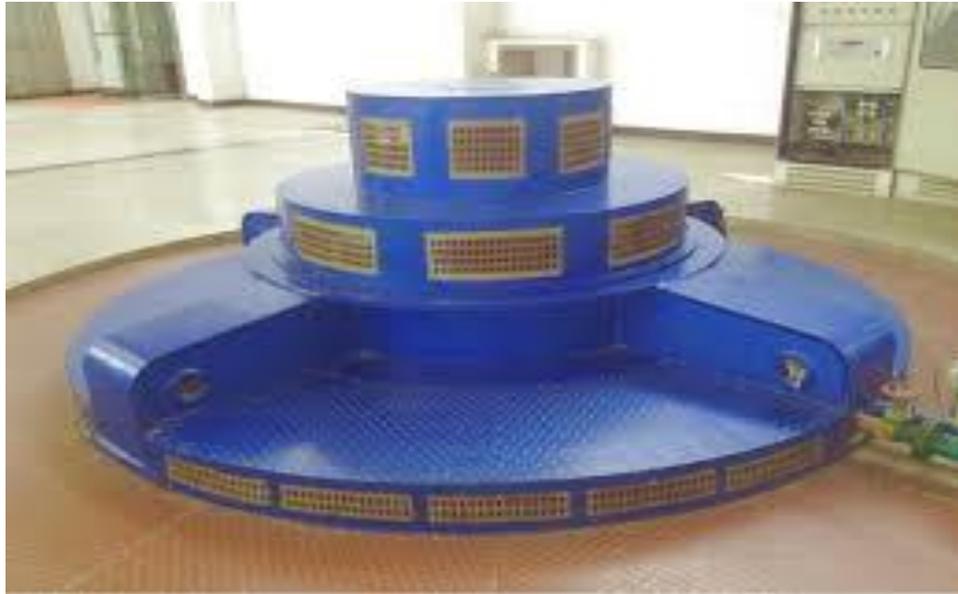
En el Memorando Múltiple 018-2012-ANA-DCPRH-ERH-SUP, se define el caudal ecológico y sus metodologías para evaluarlo. Los principales cálculos a realizar son (según numeración del documento):

- Para cursos de agua con caudales medios anuales menores a  $20\text{m}^3/\text{s}$ , el caudal ecológico será como mínimo el 10% del caudal medio mensual para la época de avenida, y para la época de estiaje será de un 15% del caudal medio mensual.
- Para cursos de agua con caudales medios anuales iguales o mayores a  $20\text{m}^3/\text{s}$  y menores o iguales a  $50\text{m}^3/\text{s}$ , el caudal ecológico se determinará como un porcentaje del caudal medio mensual siendo este el 10% para la época de avenidas, y para la época de estiaje será de un 12% del caudal medio mensual.
- Para cursos de agua con caudales medios anuales mayores a  $50\text{m}^3/\text{s}$ , el caudal ecológico corresponderá al 10% del caudal medio mensual para todos los meses del año.

### 3.5. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS: EXTERIOR DE LA TURBINA

#### 3.5.1. Generador

*Figura 2.24. Exterior de una turbina Kaplan*



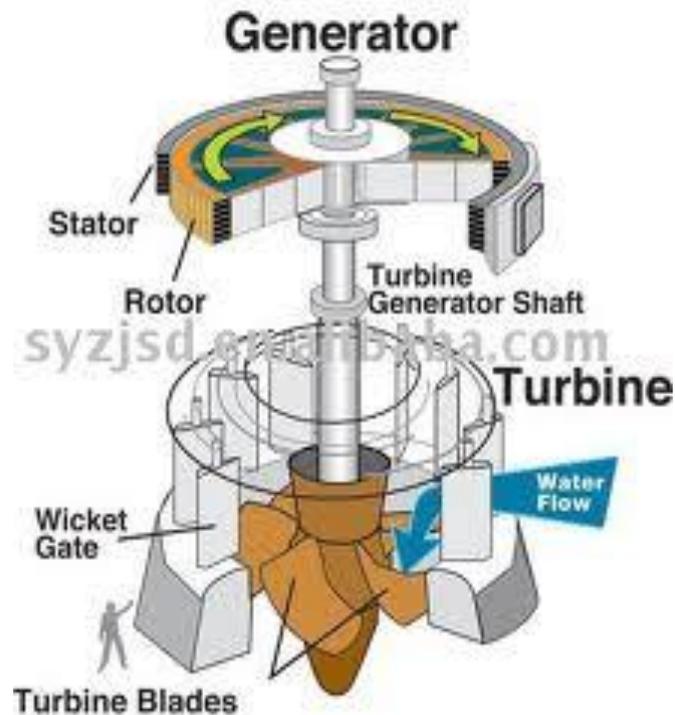
**Fuente: Oxyman Comercial SAC – Pequeña Central  
Hidroeléctrica del Huayco**

El generador tiene como misión transformar en energía eléctrica la energía mecánica suministrada por la turbina.

El generador debe ser construido de manera que pueda resistir cualquier exceso de velocidad que pueda presentarse. Dicho exceso es del orden del 85% hasta el 100% para generadores accionados por turbinas hidráulicas.

El generador es de eje horizontal acoplado en toda su estructura directamente encima de la turbina; siendo el estator un acople directo al eje de la turbina; mayormente los generadores adoptan la misma configuración que la turbina. La Figura 2.25. muestra una configuración de la turbina Kaplan de eje vertical de 600rpm, directamente acoplada a un generador de 6 polos. Con frecuencia, se utiliza un volante de inercia para suavizar las variaciones de par y facilitar el control de la turbina.

**Figura 2.25. Turbina Kaplan con respecto al generador**



**Fuente: Oxyman Comercial SAC – Pequeña Central  
Hidroeléctrica del Huayco**

Estos generadores, si son pequeños, se refrigeran con aire en circuito abierto; cuando son mayores, se refrigeran por agua en circuito cerrado, empleando intercambiadores agua-aire.

### **3.5.1.1. Generador asíncrono**

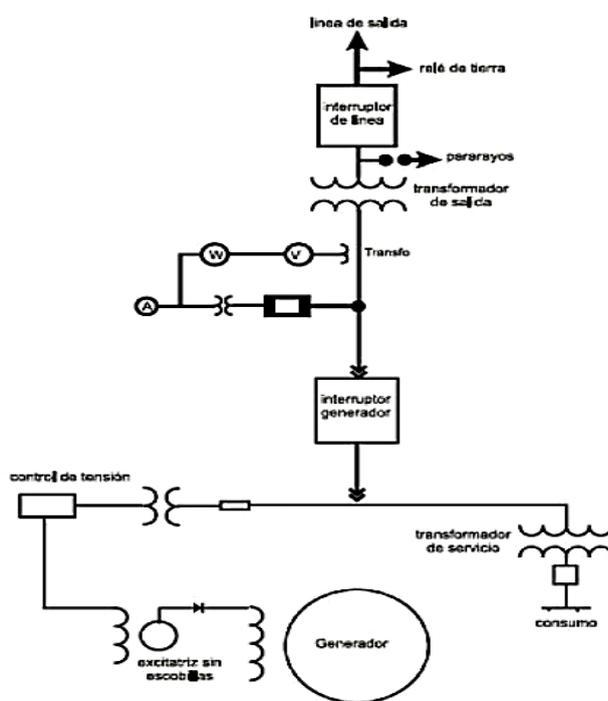
Un generador asíncrono necesita, para asegurar su magnetización, tomar una cierta potencia reactiva de la red. La red es también la que marca la frecuencia, y el generador aumenta su deslizamiento a medida que aumenta la potencia suministrada por la turbina. El generador asíncrono presenta la ventaja adicional de no necesitar excitatriz, lo que simplifica el equipo y facilita las maniobras secuenciales de arranque. Para ello se actúa sobre la admisión de la turbina, acelerándola ligeramente por encima de su velocidad de sincronismo, momento en

el que un sensor de velocidad da la orden de cierre del interruptor de línea. El generador pasa rápidamente de la velocidad de hipersincronismo, a la necesaria para que se igualen los pares motor y resistente en la zona de funcionamiento estable.

### 3.5.2. Equipos de sincronización y protección eléctrica

En todos los países, los reglamentos para el suministro de electricidad, obligan a las compañías distribuidoras a mantener, entre límites muy estrechos, la seguridad y la calidad de servicio. El productor independiente, si su central está conectada a la red, tiene que operarla de forma que la compañía distribuidora pueda cumplir con esa obligación. Para ello entre los terminales del generador y la línea de salida, se instalan dispositivos que monitorizan el funcionamiento del equipo, protegen al generador, lo conectan a la red o lo aíslan de la misma en caso de avería. La Figura 2.25 muestra un esquema unifilar.

**Figura 2.26. Esquema unifilar**



Fuente: Guía para el Desarrollo de una Pequeña Central Hidroeléctrica ESHA-2006, Programa de Energía Inteligente para Europa (IEE) ,1998

La monitorización se lleva a cabo mediante aparatos más o menos sofisticados para medir la tensión, intensidad y frecuencia en cada una de las tres fases; la energía producida por el generador, su factor de potencia, y eventualmente el nivel de agua en la cámara de carga.

La tensión e intensidad de corriente se monitorizan mediante transformadores de potencia (PTs) y de corriente (CTs), para reducir su valor, generalmente muy elevado, a niveles más manejables.

Para que los diferentes sistemas de protección puedan cumplir su misión, se necesita un interruptor principal; ya sea de aire comprimido, magnético o de vacío, capaz de aislar el generador de la red, aun cuando esté trabajando a plena carga.

Como elementos de protección se necesitan:

- Relés de protección de la interconexión que garantizan la desconexión en el caso de un fallo en la red.
- Relés de mínima tensión conectados entre fases.
- Relés de máxima tensión

### ***REGISTRO DE NIVELES EN LA CÁMARA DE CARGA Y EN EL CANAL DE DESCARGA PARA FUNCIONAMIENTO Y PROTECCIÓN DE LA CASA DE MÁQUINAS***

En una central, es absolutamente necesario conocer en todo momento nivel de agua: aguas arriba y aguas abajo de la turbina. El método más sencillo utiliza una regla graduada en metros y centímetros, al estilo de las miras topográficas, que alguien tiene que observar

físicamente para poder registrar las lecturas. En una central sin personal, este sistema es a todas luces inadecuado.

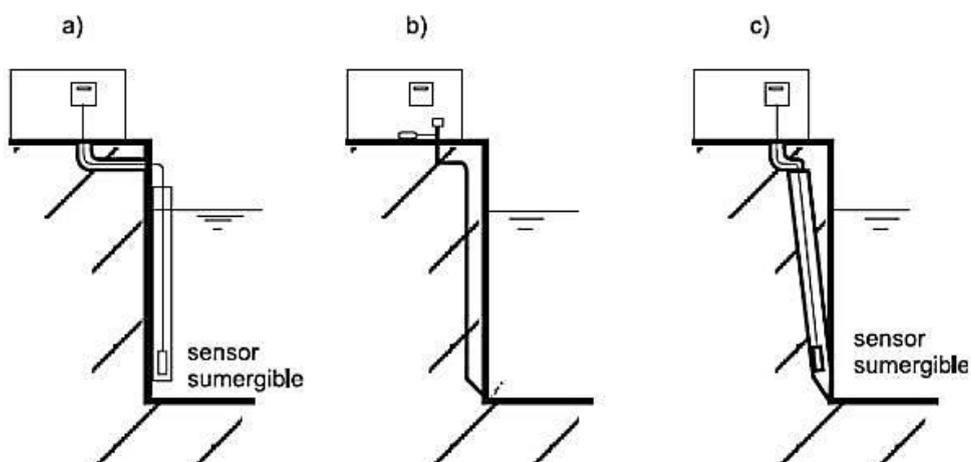
El sistema tradicional utiliza un flotador que registra el nivel sobre una cinta de papel continuo, pero su lectura posterior es engorrosa. Si la central tiene un sistema de control automático, lo más lógico es utilizar para ese fin un dispositivo equipado con transductores conectados al ordenador, que acumula las lecturas en una base de datos y envía estos al programa para que tome las medidas oportunas, entre las que se incluye la emisión de una alarma cuando se considere necesaria una intervención externa.

Actualmente, se tienden a separar el sensor y el transductor. El sensor se colocará allí donde se quiere efectuar la medida, o en sus cercanías, con lo que es fácil que esté sujeto a condiciones muy desfavorables y de difícil acceso.

El transductor podrá estar situado en una zona segura y fácilmente accesible con lo que se facilita su vigilancia y su mantenimiento. El sistema a utilizar en las medidas de nivel viene condicionado a la precisión con que se quiere efectuar la medida; en el caso de las pequeñas centrales, un sensor piezoeléctrico, con una precisión del 0,1%, será suficiente.

La elección del punto de medida resulta también particularmente crítica; la colocación del sensor en un punto donde puede haber variaciones importantes de la velocidad de corriente dará lugar a resultados erróneos.

**Figura 2.27. Medida de niveles del agua**



**Fuente: Guía para el Desarrollo de una Pequeña Central Hidroeléctrica ESHA-2006, Programa de Energía Inteligente para Europa (IEE) ,1998**

El sensor de nivel puede transmitir la señal utilizando el método hidrostático (Figura 2.26 a) o el neumático (Figura 2.26 b). En el primer caso, hay que cuidar que los tubos que transmiten la presión no puedan obstruirse ni puedan acumular aire. En el segundo caso, hay que conseguir que el orificio del sensor de donde salen las burbujas de aire, esté cerca del nivel de la lámina de agua en el inicio de las mediciones o por debajo de él y que el agua no pueda penetrar en los tubos. La mejor solución es ocultar el sensor y sus tubos en el interior de la pared, de forma que esta sea plana y no produzca alteraciones locales en la velocidad de la corriente y la proteja al mismo tiempo de cualquier golpe eventual.

### **3.5.3. Telecontrol**

La mayoría de las pequeñas centrales trabajan sin personal permanente y funcionan mediante un sistema automático de control. Como no hay dos centrales iguales, resulta casi imposible

definir su configuración óptima. No obstante, existen requisitos de aplicación general.

1. Todo sistema debe contar con dispositivos de control y medida de accionamiento manual para el arranque, totalmente independiente del control automático.
2. El sistema debe incluir los dispositivos necesarios para poder detectar el funcionamiento defectuoso de cualquier componente importante, y poder desconectar inmediatamente la central de la red.
3. Tiene que haber un sistema de telemetría que recoja, en permanencia, los datos esenciales para el funcionamiento de la planta poniéndolos al alcance del operador para que este pueda tomar las decisiones convenientes. Esos datos deberán ser almacenados en una base de datos, para una ulterior evaluación de la central (Figura 2.27).
4. Debe incluir un sistema de control inteligente para que la central pueda funcionar sin personal.
5. Debe ser posible acceder al sistema de control desde un punto alejado de la central para poder anular cualquier decisión tomada por el sistema inteligente.
6. El sistema debe poder comunicar con las centrales situadas aguas arriba y aguas abajo, si es que existen, para optimizar la operación del conjunto.
7. La anticipación de fallos constituye una mejora importante del sistema. Utilizando un sistema experto, en conjunción con una base de datos operacional, se pueden detectar los fallos antes que se produzcan y tomar las decisiones necesarias para que no ocurran.

**Figura 2.28. Tableros de telemetría**



**Fuente: Oxyman Comercial SAC – Pequeña Central  
Hidroeléctrica del Huayco**

El sistema debe configurarse por módulos: un módulo de conversión analógico a digital para medir el nivel de agua, ángulo de los alabes distribuidores (y o del rodete), potencia instantánea, temperaturas, etc.; un módulo de conversión digital a analógico para accionar las válvulas del circuito hidráulico, los registradores etc.; un módulo para contar los kWh generados, el caudal, la intensidad de precipitación etc.; un módulo «inteligente» de telemetría con las interfaces de comunicación, vía línea telefónica, radio, etc. Este enfoque modular se presta a satisfacer los diferentes requisitos de cada central, permitiendo la normalización del «hardware» y del «software», reduciendo el costo y facilitando el mantenimiento.

Los sistemas de control automáticos contribuyen a aumentar la disponibilidad de la central, y hacer trabajar a las turbinas con una mayor eficiencia, produciendo así más kWh, con el mismo volumen de agua. Con la generalización de los ordenadores personales, los precios de estos equipos resultan inferiores a los de los antiguos procesadores programables (PLC). La posibilidad de utilizar nuevos componentes, como discos duros y una variedad de periféricos, la alimentación en corriente continua procedente de las baterías de la central; la variedad y fiabilidad de

las tarjetas de entrada y salida de datos; los dispositivos de vigilancia (.watchdog.) del funcionamiento de la CPU, son otros tantos triunfos en manos del proyectista que puede ensamblar a bajo precio el hardware necesario, utilizando componentes estándar. El software se diseña también con criterio modular para que su adaptación a cada planta, pueda hacerse rápidamente y a bajo costo. La generalización de los sistemas CAD permiten dibujar con precisión un sinóptico de la planta y visualizar los diferentes componentes que intervienen en el sistema. Los nuevos microprocesadores hacen posible el trabajo en tiempo real para hacer frente a las alarmas y acontecimientos. Los nuevos lenguajes de programación permiten programar fácilmente secuencias lógicas como las de arranque y parada.

#### **A. EL TABLERO DE CONTROL**

Cuenta con los instrumentos de medición básicos (voltímetro y amperímetro), y los respectivos diodos rectificadores de corriente alterna en continua para 12 V (Figura 2.25).

##### **a) El convertidor**

Es el componente encargado de convertir la corriente continua proveniente de las baterías en corriente alterna. Los dispositivos convertidores se caracterizan por su elevado costo y por su reducida eficiencia por lo que deberían ser los más pequeños posibles. Los convertidores pueden ser rotativos y estáticos. El rotativo o dinámico es un motor de CC que gira a una velocidad constante y que está conectado a un generador de CA, su eficiencia es del orden de 50 a 75% y presenta una corriente de vacío de 15 a 20%. El convertidor estático de estado sólido convierte la CC en CA de 60 Hz a través de medios electrónicos, su eficiencia es del 85% y solo lleva una corriente de vacío de 2 a 4%. Los convertidores

rotativos cuestan menos que los estáticos y cuando compiten en función de la carga no hay mucha diferencia entre ambos en lo que respecta a pérdidas. Sin embargo, el uso de este dispositivo no es recomendable en la presente aplicación por ser de naturaleza doméstica.

#### **b) El regulador de carga**

Es importante conocer el funcionamiento de un regulador o controlador de carga, porque este es necesario cuando se utilizan baterías. El controlador de carga es un dispositivo electrónico que regula el estado de carga entre límites preestablecidos. El voltaje de las baterías se mide y se toma como factor principal para estimar el estado de carga, además del voltaje; algunos controladores miden la temperatura de la batería. Es muy importante el uso de un controlador de carga para incrementar la vida útil de las baterías.

#### **c) La batería**

Es la parte encargada de almacenar la energía eléctrica producida por el generador en forma de corriente continua. Existen dos grandes tipos de baterías para el almacenamiento de electricidad, la de plomo – ácido y la batería alcalina (tanto la de níquel – hierro como la de níquel –cadmio).

**Figura 2.29. Tablero de control**



**Fuente: Oxyman Comercial SAC – Pequeña Central  
Hidroeléctrica del Huayco**

Descripción detallada del generador

Sistema hidroeléctrico síncrono trifásico de la excitación del generador de la CA con la turbina Kaplan

1. Capacidad de salida: 1000 kW
2. Frecuencia: 60hz
3. Voltaje de salida: 480V, 360V, 220V, CA trifásica.

El generador síncrono es conducido por la turbina del agua (turbina hidráulica), y forma una unidad completa con la turbina Kaplan. La estructura de la instalación es determinada generalmente por el tipo de turbina.

Clase del aislamiento: Rotor del estator: Clase de F/B

Factor de poder clasificado: 0,8, 0,85 o 0,9, según los requisitos del uso.

Tipo de enfriamiento: Refrigeración por aire o refrigeración por agua. Medida de la temperatura: PT100 conectan con los dispositivos digitales del control o de la inspección de la temperatura.

#### 3.5.4. Transformador

##### ➤ **TRANSFORMADOR DE SERVICIO**

El consumo propio de la central; incluidos los dispositivos mecánicos, hidráulicos e iluminación, es del orden del 1 al 3 por ciento de su capacidad; las micro centrales (menos de 500kW) tienen un consumo porcentual más elevado la cantidad de potencia que producirá la “**CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE EL HUAYCO**” un poco más de 1000 kW y el consumo que tendremos será mucho menor.

El transformador de servicio debe diseñarse pues para esa carga. Para alimentar ese transformador. En una central sin personal permanente, hay que prever, si es posible, dos fuentes exteriores de suministro diferentes, con intercambiador automático (Figura 2.29).

**Figura 2.30. Transformador**



**Fuente: Oxyman Comercial SAC – Pequeña Central  
Hidroeléctrica del Huayco**

➤ **SUMINISTRO DE CORRIENTE CONTINUA PARA EL SISTEMA DE CONTROL**

Las centrales, sobre todo si están operadas por control remoto, necesitan un sistema permanente de corriente continua a 24 V proporcionado por un banco de baterías. La capacidad del banco en amperios/hora debe ser suficiente para que en caso de corte de corriente al cargador, el funcionamiento del sistema de control quede asegurado, en tanto se toman las medidas pertinentes para recuperar el suministro.

**3.5.5. Subestación exterior**

La subestación, situada normalmente al aire libre (Figura 2.30), incluye el interruptor principal que aísla de la red toda la central, así como las barras de conexión entre la salida del transformador y la línea de conexión a la red, los transformadores propiamente dichos, los pararrayos y la protección contra sobretensiones en la red. En zonas de marcada sensibilidad ecológica, la subestación se ubica en el interior de la casa de máquinas y la salida de los cables de conexión a la red corren sobre la tubería forzada hasta la cámara de presión, de donde salen vía aérea o enterrados

**Figura 2.31. Subestación**



**Fuente: Oxyman Comercial SAC – Pequeña Central Hidroeléctrica del Huayco**

### 3.6. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Luego de haber realizado el metrado y conocer el presupuesto para este proyecto (Anexo 3), se hizo una evaluación económica, para verificar dentro de cuánto se ha de recuperar el capital invertido.

**Cuadro. 4 esquema de comparación , electricidad generada y electricidad comprada**

	Entrega de suministro energético SEAL			Estimado a una producción de 27 días
	Rocatech	Oxyman Comercial	localidad El Huaico	
consumo 15hr	440	40	40	
PRODUCCION DIARIA S/.	16500	4000		553500
total de bolsas diarias aprox.		1138		
costo bolsa vendida		14.5		
costo total de producción unid.		5.6		= 6372.8
COSTO TOTAL POR KW/h x 27 días		S/. 0.10	1800	19800
		gastos operativos		28000
		gastos de mantenimiento		9000
		BENEFICIOS ANTES DE AMORT, INTERERES		488527.2

	Producción de 1000kw Turbina Kaplan			Estimado a una producción de 27 días
	Rocatech	Oxyman Comercial	localidad El Huaico	
consumo 24hr	640	280	80	
PRODUCCION DIARIA S/.	24800	8000	120	888840
total de bolsas diarias aprox.		1710		
costo bolsa vendida		14.5		
costo total de producción unid.		5.6		9576
		tendríamos una ganancia mensual de :		879264
		gastos operativos		38000
		gastos de mantenimiento		17000
		BENEFICIOS ANTES DE AMORT, INTERERES		824264

costo total de proyecto parte civil + mecánica 7,359,856.52 se estima en cancelarlo en meses=	17.8580079
---	------------

## CONCLUSIONES

PRIMERA: Para la PCH de El Huayco, la turbina más adecuada es la turbina Kaplan de eje vertical de doble regulación por ajustarse a los parámetros establecidos en los cálculos de selección por altura por salto neto, velocidad de caudal, así como potencia y rendimiento; si bien no es la más económica, merece su inversión ya que la recuperación de la inversión es rápida y sus componentes son de mayor durabilidad y rendimiento.

SEGUNDA: Con los cálculos y dimensionamientos efectuados en la tubería forzada (material utilizado, espesor, diámetro, peso, longitud, etc.), casa de máquinas y turbina Kaplan así como los cálculos de pérdidas de los mismos, han de generar un mínimo de 1.0 MW.

TERCERA: A la empresa *OXYMAN COMERCIAL SAC.*, y su ampliación *ROCATECH SAC.*, la adquisición e instalación la turbina Kaplan de doble regulación, les va a significar una inversión aproximada de 348 500.00 dólares con la cual podrán ampliar sus instalaciones así como mejorar su producción.

CUARTA: En los cálculos y dimensionamiento para la instalación de la turbina en la PCH, se tuvo que tener presente siempre el factor económico; es decir, se buscó dimensionar las distintas estructuras cumpliendo con los requerimientos de funcionalidad, rentabilidad, necesarios sin llegar a un sobredimensionamiento que aumente el costo.

QUINTA: El uso del agua del río Chili en la bocatoma del anexo El Huayco, no afecta su caudal ecológico tanto en épocas secas como en épocas de humedad, estando dentro de los marcos legales de la Ley 29338 de recursos hídricos, como su Reglamento el DS 001-2010-A6 y la metodología del caudal ecológico y caudal regulado de uso el cual es de 7.53 m<sup>3</sup>/seg y una persistencia del 78%, considerando las máximas y mínimas avenidas.

## RECOMENDACIONES

PRIMERA: Se recomienda comprobar datos y dimensiones con los fabricantes de turbinas y fabricantes de tuberías forzadas, ya que ellos manejan estándares propios, y puede modificar la cotización

SEGUNDA: Debido a la topografía y al potencial hídrico, existe la posibilidad de implementar una red de PCH en la cuenca del río Chili, con lo que se podría lograr cada vez una mayor eficiencia debido a la canalización y empleo del agua turbinada de manera secuencial. Esto puede constituir un tema de estudio para mejorar la explotación del recurso hídrico tanto en la cuenca del río Chili como en las cuencas aledañas.

TERCERA: Es recomendable adquirir todos los equipos de un solo fabricante, porque podrían presentarse problemas posteriores relacionados con la instalación, montaje, acople o compatibilidad.

## BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN

- [MATA75] Mataix, Claudio, "Turbomáquinas Hidráulicas", ICAI, 1975. [WHIT04] White, Frank M., "Mecánica de Fluidos", McGraw Hill, 2004.
- DISEÑO HIDRÁULICO Y MECÁNICO DE LA CENTRAL MINIHIDROELÉCTRICA:  
JULIÁN MARTÍN DE EUGENIO POZA. (2008). DISEÑO HIDRÁULICO Y MECÁNICO DE LA CENTRAL MINIHIDROELÉCTRICA DEL EMBALSE DE VALMAYOR . Madrid - España: UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS.  
<https://www.iit.comillas.edu/pfc/resumenes/486819da9092d.pdf>
- DISEÑO GRUPO HIDROENERGETICO MICHELL BANKI 120kW:  
Johel Víctor Benites Príncipe . (2014). DISEÑO DE UN GRUPO HIDROENERGÉTICO MICHELL-BANKI DE 120 kW Lima - Perú: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
[http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/5449/BENITES\\_JOHEL\\_DISE%C3%91O\\_GRUPO\\_HIDROENERGETICO\\_MICHELL\\_BANKI\\_120KWpdf?sequence=1](http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/5449/BENITES_JOHEL_DISE%C3%91O_GRUPO_HIDROENERGETICO_MICHELL_BANKI_120KWpdf?sequence=1).
- SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE TURBINAS HIDRÁULICAS:  
Héctor García Gutiérrez Arturo Nava Mastache. (2013). SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE TURBINAS HIDRÁULICAS PARA CENTRALES HIDROELÉCTRICAS. Mexico: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.  
[http://www.ingenieria.unam.mx/~deptohidraulica/publicaciones/pdf\\_publicaciones/SELECCyDIMENSIONAMIENTOdeTURBINAS.pdf](http://www.ingenieria.unam.mx/~deptohidraulica/publicaciones/pdf_publicaciones/SELECCyDIMENSIONAMIENTOdeTURBINAS.pdf)
- GUÍA PARA EL DESARROLLO DE UNA PEQUEÑA CENTRAL HIDROELÉCTRICA ESHA 2006:  
European Small Hydropower Association. (2006). Guía para el Desarrollo de una Pequeña Central Hidroeléctrica. Colombia: ESHA.  
[http://www.cnr.gob.cl/Home/Documentacin%20Complementaria/GUIA\\_Layman\\_ESHA\\_PCH.pdf](http://www.cnr.gob.cl/Home/Documentacin%20Complementaria/GUIA_Layman_ESHA_PCH.pdf)
- GUÍA DE DESARROLLO PARA PEQUEÑA CENTRAL HIDROELÉCTRICA INEA:  
Ministerio de Minas y Energía. (1997). Guía de Diseño para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas. Santafé de Bogotá ,Colombia: INEA.  
[http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/energias\\_alternativas/potencialidades/GUIA%20DE%20DISENO%20PARA%20PEQUENAS%20CENTRALES.pdf](http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/energias_alternativas/potencialidades/GUIA%20DE%20DISENO%20PARA%20PEQUENAS%20CENTRALES.pdf)
- MINI CENTRAL HIDROELECTRICA:  
Nestor Gutierrez Fernandez. (2002). Minicentral Hidroelectrica. España: Universidad Rovira i Virgili.

<http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/157pub.pdf>

- EQUIPOS ELECTROMECÁNICOS:  
Ing. Amancio R. Rojas flores. (2011). Equipos Electromecanicos.  
Chimbote - Perú: Universidad Nacional del Santa  
[http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/equipos\\_electr\\_omecanicos.pdf](http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/equipos_electr_omecanicos.pdf)
- DETECCIÓN DE CAVITACIÓN EN TURBINAS:  
Pedro Ayuso, Jorge-Mauro. (2004). Detección de cavitación en  
turbina Francis. Universidad Politecnica De Catalunya -  
Barcelonatech: revisado por :Escaler Puigoriol, Francesc Xavier.  
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/2632/31091-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

**ANEXO 1**  
**PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA**

<b>PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA</b>							
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Peso específico (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Módulo de elasticidad (kN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Viscosidad dinámica (N·s/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>Tensión superficial (N/m)</b>	<b>Presión de vapor (kN/m<sup>2</sup>)</b>
0	9,805	999,8	$1,98 \cdot 10^6$	$1,781 \cdot 10^{-3}$	$1,785 \cdot 10^{-6}$	0,0765	0,61
5	9,807	1000,0	$2,05 \cdot 10^6$	$1,518 \cdot 10^{-3}$	$1,519 \cdot 10^{-6}$	0,0749	0,87
10	9,804	999,7	$2,10 \cdot 10^6$	$1,307 \cdot 10^{-3}$	$1,306 \cdot 10^{-6}$	0,0742	1,23
15	9,798	999,1	$2,15 \cdot 10^6$	$1,139 \cdot 10^{-3}$	$1,139 \cdot 10^{-6}$	0,0735	1,70
20	9,789	998,2	$2,17 \cdot 10^6$	$1,102 \cdot 10^{-3}$	$1,003 \cdot 10^{-6}$	0,0728	2,34
25	9,777	997,0	$2,22 \cdot 10^6$	$0,890 \cdot 10^{-3}$	$0,893 \cdot 10^{-6}$	0,0720	3,17
30	9,764	995,7	$2,25 \cdot 10^6$	$0,708 \cdot 10^{-3}$	$0,800 \cdot 10^{-6}$	0,0712	4,24
40	9,730	992,2	$2,28 \cdot 10^6$	$0,653 \cdot 10^{-3}$	$0,658 \cdot 10^{-6}$	0,0696	7,38
50	9,689	988,0	$2,29 \cdot 10^6$	$0,547 \cdot 10^{-3}$	$0,553 \cdot 10^{-6}$	0,0679	12,33
60	9,642	983,2	$2,28 \cdot 10^6$	$0,466 \cdot 10^{-3}$	$0,474 \cdot 10^{-6}$	0,0662	19,92
70	9,589	977,8	$2,25 \cdot 10^6$	$0,404 \cdot 10^{-3}$	$0,413 \cdot 10^{-6}$	0,0644	31,16
80	9,530	971,8	$2,20 \cdot 10^6$	$0,354 \cdot 10^{-3}$	$0,364 \cdot 10^{-6}$	0,0626	47,34
90	9,466	965,3	$2,14 \cdot 10^6$	$0,315 \cdot 10^{-3}$	$0,326 \cdot 10^{-6}$	0,0608	70,10
100	9,399	958,4	$2,07 \cdot 10^6$	$0,282 \cdot 10^{-3}$	$0,294 \cdot 10^{-6}$	0,0589	101,33

## ANEXO 2

### Registros Históricos de las Estaciones

Para el presente trabajo, se obtuvo la información del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI; correspondiente a las Estación Linimétrica dentro del área de estudio. la característica de esta estación es lo siguiente:

<u>Estación</u> <u>Provincia</u>	<u>Altitud</u>	<u>Latitud</u>	<u>Longitud</u>	<u>Distrito</u>
HLG Puente del Diablo Arequipa	1990	16 25'36.43"	71 40'30.12"	Uchumayo

A continuación se presenta los registros históricos de la estación hidrométrica del Puente del Diablo:

**Tabla 2.3** Descarga Máxima y Mínima Anual de la Estación Puente del Diablo.

N°	Año	Caudal Max (m3/s)	Caudal Min (m3/s)
1	1968	60.500	4.600
2	1969	32.600	4.760
3	1970	54.000	6.810
4	1971	58.900	5.020
5	1972	161.200	5.260
6	1973	62.600	0.285
7	1974	112.000	7.170
8	1975	508.000	6.140
9	1976	39.200	5.880
10	1977	74.800	5.140
11	1978	20.032	4.450
12	1979	9.300	4.740
13	1980	12.500	2.580
14	1981	16.700	4.870
15	1982	10.576	6.160
16	1983	13.900	2.310
17	1984	105.390	8.070
18	1985	15.600	12.400
19	1986	S/D	10.905
20	1987	17.590	3.800
21	1988	72.197	6.560
22	1989	29.733	6.811
23	1990	14.043	1.432
24	1991	9.737	2.754
25	1992	7.575	1.091

26	1993	13.386	1.728
27	1994	43.530	3.931
28	1995	9.180	4.482
29	1996	S/D	S/D
30	1997	S/D	S/D
31	1998	S/D	S/D
32	1999	S/D	S/D
33	2000	S/D	S/D
34	2001	S/D	S/D
35	2002	S/D	S/D
36	2003	25.020	8.063
37	2004	90.463	8.455
38	2005	77.660	6.891
39	2006	82.678	7.272
40	2007	24.511	8.421
41	2008	30.104	6.835
42	2009	37.715	5.131
43	2010	14.132	4.677
44	2011	204.000	7.148
45	2012	53.222	7.842
46	2013	137.260	8.800

### ANEXO 3

#### Cuadro de duración de potencias y energías

N°	Caudal(m3/s)	Intervalo	Caudal Medi	N° Ocurrenc	Frecuencia	Duracion %	Pot Relat (Kw)	Energ (Kwh/año)
1	93.21	94-92	93.00	1	0.21	0.21	15,372.76	281,138.58
2	80.32	92-90	91.00	0	0.00	0.21	15,042.16	275,092.59
3	64.06	90-88	89.00	0	0.00	0.21	14,711.57	269,046.60
4	63.12	88-86	87.00	0	0.00	0.21	14,380.97	263,000.61
5	60.62	86-84	85.00	0	0.00	0.21	14,050.37	256,954.62
6	58.75	84-82	83.00	0	0.00	0.21	13,719.78	250,908.63
7	52.20	82-80	81.00	1	0.21	0.42	13,389.18	489,725.28
8	49.70	80-78	79.00	0	0.00	0.42	13,058.58	477,633.29
9	43.64	78-76	77.00	0	0.00	0.42	12,727.98	465,541.31
10	43.11	76-74	75.00	0	0.00	0.42	12,397.39	453,449.33
11	40.35	74-72	73.00	0	0.00	0.42	12,066.79	441,357.35
12	39.60	72-70	71.00	0	0.00	0.42	11,736.19	429,265.37
13	38.75	70-68	69.00	0	0.00	0.42	11,405.60	417,173.38
14	37.98	68-66	67.00	0	0.00	0.42	11,075.00	405,081.40
15	35.20	66-64	65.00	1	0.21	0.63	10,744.40	589,484.13
16	34.63	64-62	63.00	1	0.21	0.84	10,413.81	761,794.87
17	34.45	62-60	61.00	1	0.21	1.04	10,083.21	922,013.64
18	33.51	60-58	59.00	1	0.21	1.25	9,752.61	1,070,140.42
19	33.02	58-56	57.00	0	0.00	1.25	9,422.01	1,033,864.47
20	32.46	56-54	55.00	0	0.00	1.25	9,091.42	997,588.53
21	31.46	54-52	53.00	1	0.21	1.46	8,760.82	1,121,531.34
22	31.24	52-50	51.00	0	0.00	1.46	8,430.22	1,079,209.41
23	30.69	50-48	49.00	1	0.21	1.67	8,099.63	1,185,014.25
24	30.22	48-46	47.00	0	0.00	1.67	7,769.03	1,136,646.32
25	29.04	46-44	45.00	0	0.00	1.67	7,438.43	1,088,278.39
26	28.44	44-42	43.00	2	0.42	2.09	7,107.84	1,299,888.08
27	25.36	42-40	41.00	1	0.21	2.30	6,777.24	1,363,370.99
28	25.00	40-38	39.00	2	0.42	2.71	6,446.64	1,532,658.73
29	24.74	38-36	37.00	2	0.42	3.13	6,116.04	1,677,762.52
30	23.75	36-34	35.00	3	0.63	3.76	5,785.45	1,904,487.19
31	23.74	34-32	33.00	3	0.63	4.38	5,454.85	2,094,935.90
32	23.00	32-30	31.00	3	0.63	5.01	5,124.25	2,249,108.68
33	22.79	30-28	29.00	2	0.42	5.43	4,793.66	2,279,338.63
34	22.56	28-26	27.00	0	0.00	5.43	4,463.06	2,122,142.86
35	22.51	26-24	25.00	3	0.63	6.05	4,132.46	2,191,671.76
36	22.05	24-22	23.00	8	1.67	7.72	3,801.87	2,572,569.20
37	22.03	22-20	21.00	1	0.21	7.93	3,471.27	2,412,350.43
38	21.19	20-18	19.00	7	1.46	9.39	3,140.67	2,584,661.18
39	19.68	18-16	17.00	7	1.46	10.86	2,810.07	2,672,328.05
40	19.55	16-14	15.00	12	2.51	13.36	2,479.48	2,902,075.71
41	19.39	14--12	13.00	19	3.97	17.33	2,148.88	3,261,812.18
42	19.29	12--10	11.00	60	12.53	29.85	1,818.28	4,755,171.97
43	18.42	10--8	9.00	91	19.00	48.85	1,487.69	6,366,428.59
44	18.21	8--6	<b>7.00</b>	140	29.23	78.08	1,157.09	<b>7,914,202.30</b>
45	18.10	6--4	5.00	69	14.41	92.48	826.49	6,695,935.10
46	17.96	4--2	3.00	35	7.31	99.79	495.90	4,334,975.59
47	17.64	2--0	1.00	1	0.21	100.00	165.30	1,448,014.86
48	16.87			<b>479</b>				

## ANEXO 4

### COTIZACIÓN 1

Ítem	Name	Unit price	Quantity	Total
1	Turbina	47,000	1	47,000
2	Generador	70,000	1	70,000
3	Equipos de excitación	17,000	1	17,000
4	Gobernador	20,000	1	20,000
5	Pantalla de control de temperatura	7,000	1	7,000
6	Componentes de automatización	6,000	1	6,000
7	<b>Exportación de embalaje nacional fletes</b>		11,000	
	<b>Costo de envío por mar a Jakarta, Indonesia</b>		USD6000	
8	Total (CIF JAKARA INDONESIA)	SD184,000		

## COTIZACIÓN 2



QUOTATION OFFER	HEPP
1x1130kW	

### HANGZHOU HYDROTU ENGINEERING CO.LTD

Address: West A-413, Zhejiang University NATIONAL SCIENCE PARK  
No.525 Xixi Road, Hangzhou, Zhejiang, China, 310013

### QUOTATION OFFER

**To Messers:**

**Project Name:** HEPP

1x1130kW

**Kind Attn:** Mr.Adderly Vega

**Country:** Peru

**Date:** Apr 17,  
2015

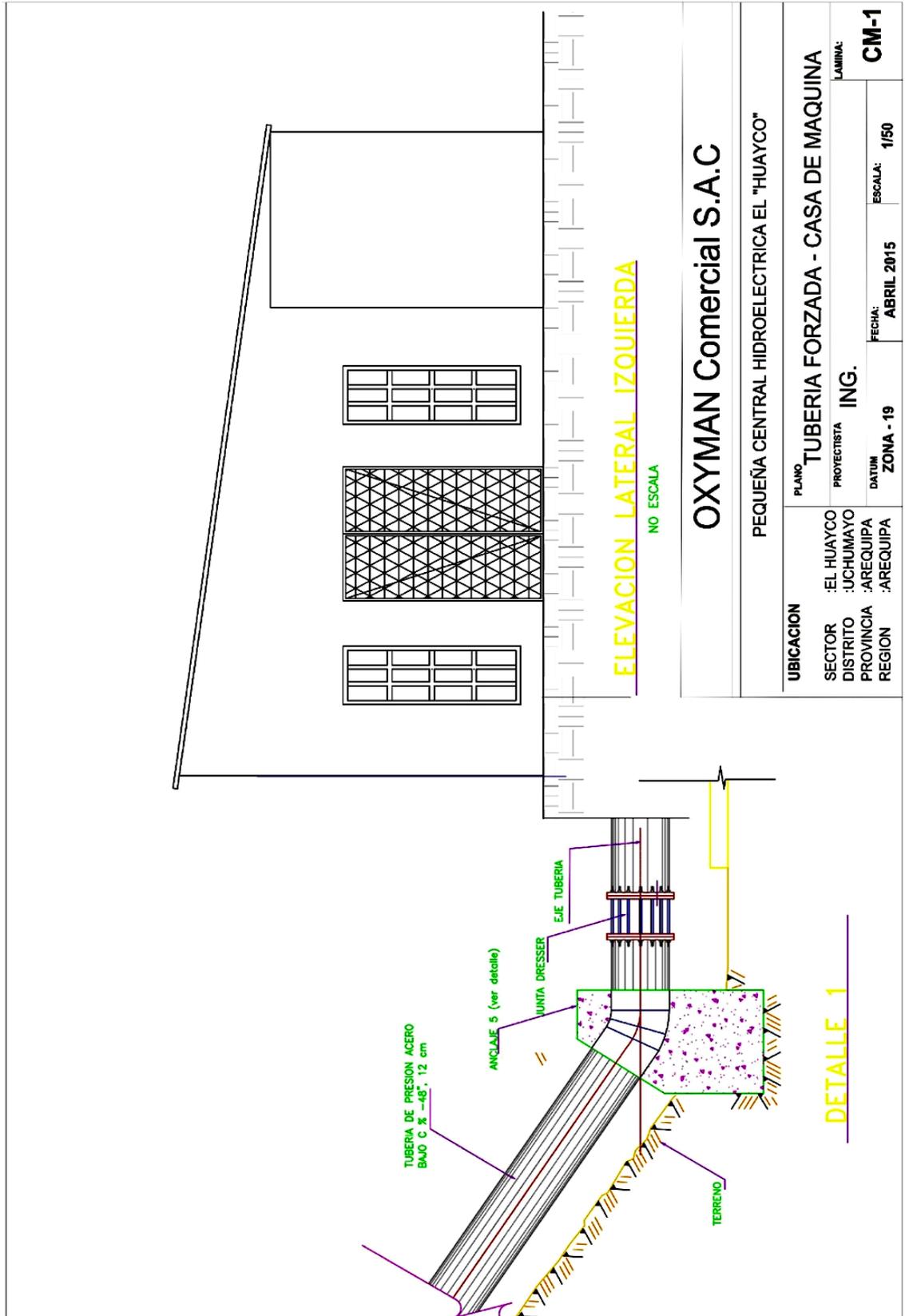
#### **I. Commercial parts:**

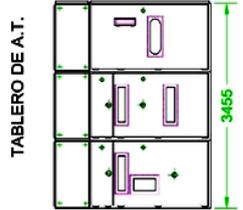
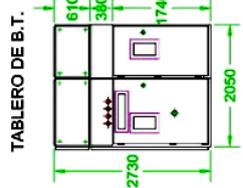
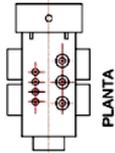
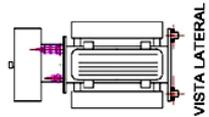
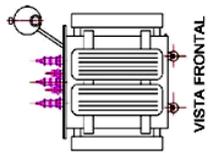
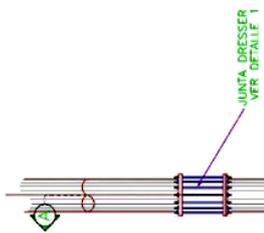
##### 1.1 Quotation

<b>Item</b>	<b>Equipment</b>	<b>Unit</b>	<b>Quan</b>	<b>Unit price</b>	<b>Total price (USD)</b>
1	Vertical Kaplan Turbine	set	1	87,800	87,800
2	Generator	set	1	139,200	139,200
3	Excitation system	set	1	21,500	21,500
4	PLC Governor	set	1	20,600	20,600
5	Unit side panel and automatic elements	set	1	15,400	15,400
6	Spare parts & special tools	lot	1	9,000	9,000
7	<b>Total FOB Shanghai price in USD</b>				293,500
8	Sea freight and Insurance				25,000
9	<b>Total CIF Peru Port price</b>				318,500
10	Supervision fee in USD				30,000
11	<b>Total contract price in USD</b>				348,500

# ANEXO 5

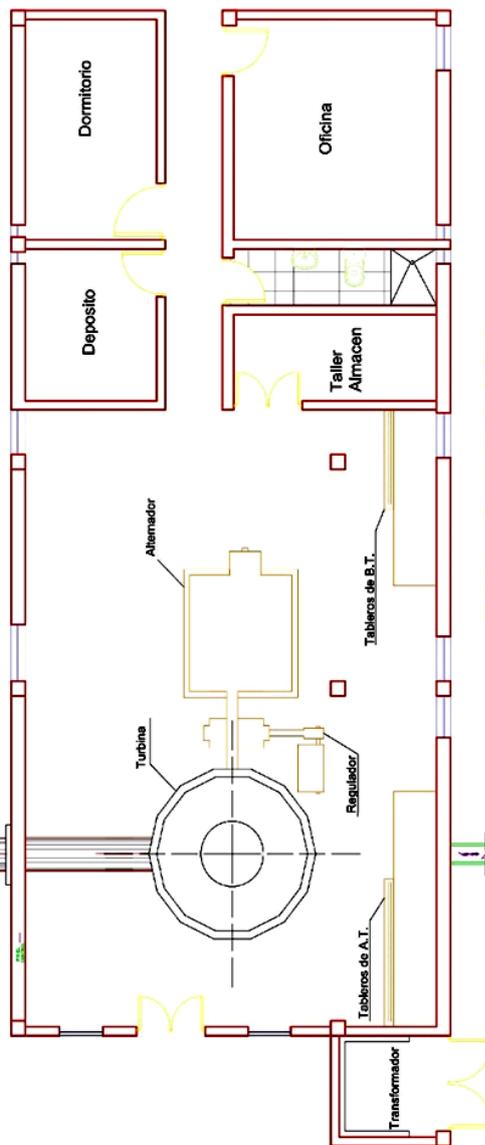
## PLANOS





CDL.DAS

VISTA LATERAL

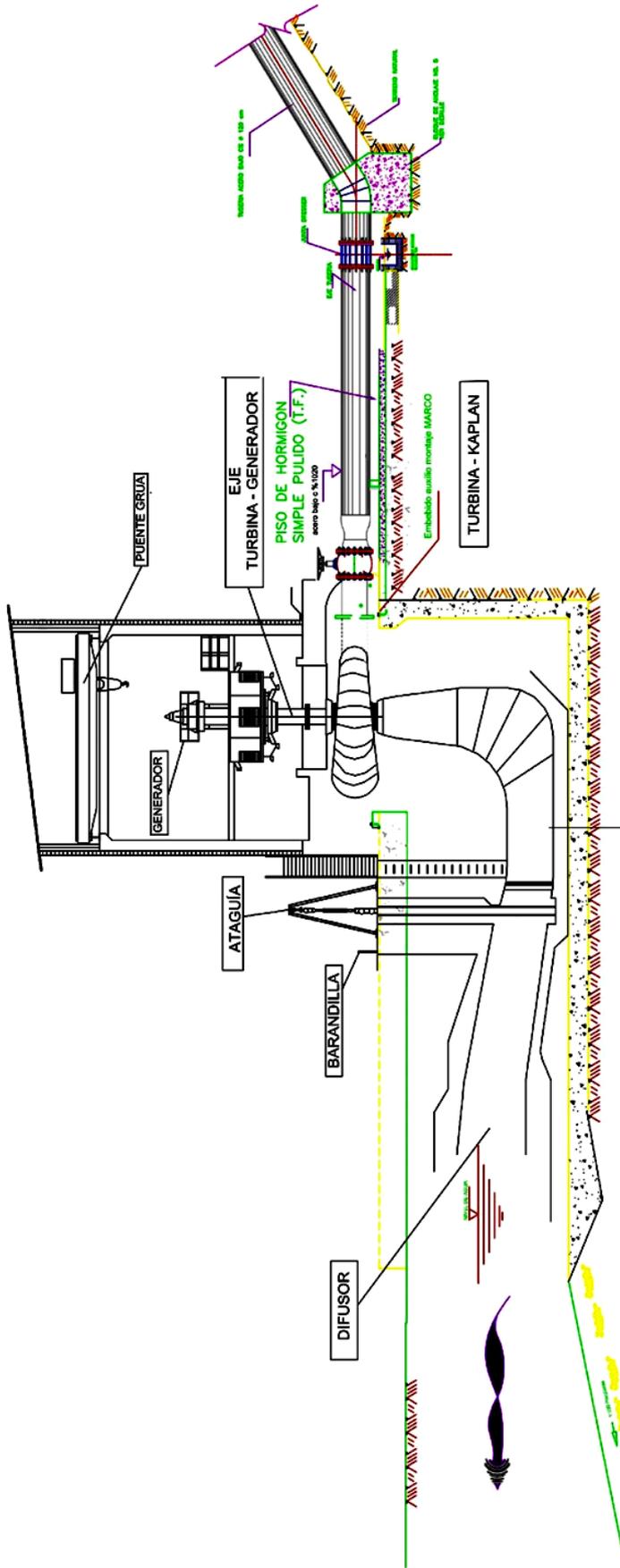


OXYMAN Comercial S.A.C

PEQUEÑA CENTRAL HIDROELECTRICA EL "HUAYCO"

UBICACION	Nombre	Numero	Fecha	Escala
SECTOR	EL HUAYCO			
PROYECTO	PROYECTO			
PROVINCIA	AREQUIPA			
REGION	AREQUIPA			
	ING.		ABRIL 2015	1:50
	ZONA-18			
				CM-1





**SECCION A-A**

NO ESCALA

**OXYMAN Comercial S.A.C**

PEQUEÑA CENTRAL HIDROELECTRICA EL "HUAYCO"

<b>UBICACION</b>		<b>PLANO</b>	
SECTOR : EL HUAYCO	PROYECTISTA : UCHUMAYO	TURBINA KAPLAN	
DISTRITO : UCHUMAYO	PROYECTISTA : ING.		
PROVINCIA : AREQUIPA	DATUM : ZONA - 19	FECHA : ABRIL 2015	ESCALA : 1/50
REGION : AREQUIPA			LAMINA : <b>CM-1</b>