

The logo for Universidad Tecnológica Nacional (UTN) is displayed in a bold, black, stylized font at the top center of the page. The letters are thick and blocky, with a slight shadow effect.

# Ingeniería de mantenimiento aplicada a pequeñas centrales hidroeléctricas: Una perspectiva práctica



Diego Ortiz Morales  
Kevin Piñeiros Burbano



**Ingeniería de mantenimiento aplicada a pequeñas centrales  
hidroeléctricas: Una perspectiva práctica**



# Ingeniería de mantenimiento aplicada a pequeñas centrales hidroeléctricas:

Una perspectiva práctica

Diego Luis Ortiz Morales

Kevin Fernando Piñeiros Burbano



## Créditos



### Edita

Editorial Universidad Técnica del Norte  
Av. 17 de Julio, 5-21 y Gral. José María  
Córdova  
Campus El Olivo  
IBARRA – IMBABURA – ECUADOR  
URL: [www.utn.edu.ec](http://www.utn.edu.ec)  
Editorial: [editorial@utn.edu.ec](mailto:editorial@utn.edu.ec)

### Autores

**Diego Luis Ortiz Morales, M.Sc**  
Universidad Técnica del Norte  
<https://orcid.org/0009-0003-8501-7337>  
[dlortiz@utn.edu.ec](mailto:dlortiz@utn.edu.ec)

**Kevin Fernando Piñeiros Burbano, Ing**  
Universidad Técnica del Norte

### Pares revisores externos

**Mantilla Guerra Aníbal Rubén, M.Sc.**

[armantilla@uce.edu.ec](mailto:armantilla@uce.edu.ec)

Universidad Central del Ecuador

**Alvaro León Ibarra Ordóñez, M.Sc.**

[aibarra@umariana.edu.co](mailto:aibarra@umariana.edu.co)

Universidad Mariana, Colombia

### Revisión de estilo

**Silvia Arciniega Hidrobo, M.Sc.**

[srarciniega@utn.edu.ec](mailto:srarciniega@utn.edu.ec)

Universidad Técnica del Norte

### Dirección de arte y diagramación

**Pedro David Cargua Gualoto**

[pdcarguag@utn.edu.ec](mailto:pdcarguag@utn.edu.ec)

Universidad Técnica del Norte

### Datos Técnicos

**ISBN:** 978-9942-572-21-9

**DOI:** 10.53358/libfica/CSYW9943

**URL:** <https://issuu.com/utnuniversity>

**Fecha de publicación:**

**Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra sin la previa autorización escrita de la Editorial Universidad Técnica del Norte.**



# Índice general

Introducción . . . . .	12
<b>Capítulo 1</b>	
<b>Obras de toma y conducción</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción . . . . .	2
1.1.1 <b>Captación</b> . . . . .	3
1.1.2 <b>Canal de conducción inicial o desripiador</b>	7
1.1.3 Tanque desarenador . . . . .	8
1.1.4 Tanque de Carga . . . . .	12
1.1.5 Tubería de presión . . . . .	17
<b>Capítulo 2</b>	
<b>Equipos Hidromecánicos</b>	<b>24</b>
2.1 Introducción . . . . .	25
2.1.1 Central Hidroeléctrica . . . . .	26
2.1.2 Equipos hidromecánicos . . . . .	28
2.1.2.1 Válvula principal o de guarda . . . . .	28
2.1.3 Turbina hidráulica tipo Francis horizontal . . . . .	30
2.1.3.1 Carcaza o caracol . . . . .	35
2.1.3.2 Distribuidor . . . . .	37
2.1.3.3 Rotor o rodete . . . . .	41
2.1.3.4 Sello tipo laberinto . . . . .	44
2.1.3.5 Cojinete guía o principal . . . . .	49
<b>Capítulo 3</b>	
<b>Mantenimiento de pequeñas centrales hidroeléctricas</b>	<b>61</b>
3.1 Mantenimiento de pequeñas centrales hidroeléctricas	62

3.1.1	Mantenimiento . . . . .	62
3.1.2	Ajuste y tolerancia dimensional . . . . .	67
3.1.3	Actividades de mantenimiento . . . . .	74
3.1.3.1	Comprobación del asentamiento de los puntos de apoyo de la máquina a la placa base . . . . .	74
3.1.3.2	Alineación y análisis de vibraciones .	79
3.1.3.3	Mantenimiento del rodete, álabes del distribuidor y otros componentes del caracol . . . . .	83
3.1.4	Mantenimiento de cojinetes . . . . .	93
3.1.5	Laberinto . . . . .	101
3.1.6	Regulador de velocidad . . . . .	104
3.1.7	Mantenimiento del generador, excitatriz y tableros de control . . . . .	110
3.1.8	Plantillas para planificación del mantenimiento	113
3.1.8.1	Plantilla de control diaria de generación . . . . .	115
3.1.8.2	Cronograma de mantenimiento mensual . . . . .	116
3.1.8.3	Datos técnicos de centrales hidroeléctricas . . . . .	117
3.1.8.4	Presupuesto de gastos de operación y mantenimiento . . . . .	120

# Índice de figuras

1	<b>Figura 1:</b> <i>Diagrama esquemático de una central hidroeléctrica (T. et al., 2025)</i> . . . . .	2
2	<b>Figura 2:</b> <i>Vista general de la captación de la central hidroeléctrica Hidrocarolina</i> . . . . .	4
3	<b>Figura 3:</b> <i>Partes principales de la captación de la central hidroeléctrica Hidrocarolina</i> . . . . .	5
4	<b>Figura 4:</b> <i>Rejilla lateral para el ingreso del flujo de agua a la línea de conducción</i> . . . . .	6
5	<b>Figura 5:</b> <i>Mecanismo de izaje de una compuerta.</i> . .	6
6	<b>Figura 6:</b> <i>Canal desripador</i> . . . . .	7
7	<b>Figura 7:</b> <i>Accionamiento del mecanismo de izaje o cierre de la compuerta del desarenador para desalojar material particulado</i> . . . . .	8
8	<b>Figura 8:</b> <i>Vista general de un desarenador horizontal</i>	9
9	<b>Figura 9:</b> <i>Vista general de un desarenador horizontal luego del proceso de limpieza</i> . . . . .	10
10	<b>Figura 10:</b> <i>Compuerta de limpieza del desarenador</i> .	11
11	<b>Figura 11:</b> <i>Vista del vertedero de ingreso de agua al canal de conducción</i> . . . . .	12
12	<b>Figura 12:</b> <i>Vista general del tanque de presión para una central hidroeléctrica.</i> . . . . .	13
13	<b>Figura 13:</b> <i>Zona final del tanque de presión.</i> . . . .	14
14	<b>Figura 14:</b> <i>Relación Tanque de carga y Tubería de presión.</i> . . . . .	15
15	<b>Figura 15:</b> <i>Tanque de carga</i> . . . . .	16

16	<b>Figura 16:</b> Montaje de la tubería de presión tipo GRP desde el tanque de carga a cuarto de máquinas , altura neta 65 m. . . . .	18
17	<b>Figura 17:</b> Brida final de la tubería de presión para conectar con la tubería principal que va hacia la turbina . . . . .	19
18	<b>Figura 18:</b> Sistemas de anclaje de la tubería de presión que va desde el tanque de carga a casa de máquinas	20
19	<b>Figura 19:</b> Conexión entre la brida final de la tubería de presión y una turbina Francis horizontal en la casa de máquinas . . . . .	23
20	<b>Figura 20:</b> Equipos electromecánicos de la pequeña central hidroeléctrica Hidrocarolina de 250 Kw . . . . .	25
21	<b>Figura 21:</b> Sistema bypass para compensación de presiones previa a la apertura de la válvula principal . . . . .	30
22	<b>Figura 22:</b> Ingreso de agua al rotor por la cámara espiral, sistemas de alabes del distribuidor y codo de descarga del agua turbinada . . . . .	32
23	<b>Figura 23:</b> Turbina Francis de 475 KW, 900 rpm, caudal 1,64 m <sup>3</sup> /seg, altura máxima de caída 38m . . . . .	34
24	<b>Figura 24:</b> Caracol de una turbina Francis y sus álabes directrices interiores . . . . .	36
25	<b>Figura 25:</b> Anillos posterior y frontal del caracol que son de referencia para el montaje de otros elementos de la turbinas . . . . .	37
26	<b>Figura 26:</b> Distribuidor de una turbina Francis horizontal con sus elementos complementarios para guía y control del flujo de agua en el interior de la turbina	38
27	<b>Figura 27:</b> Álabes directrices en posición cerrada y su mecanismo de accionamiento . . . . .	39
28	<b>Figura 28:</b> Posición de álabes directriz al interior del caracol y sistema de accionamiento con el regulador de velocidad de una turbina Francis . . . . .	40
29	<b>Figura 29:</b> Partes de un rodete . . . . .	41
30	<b>Figura 30:</b> Proceso de transformación de la energía hidráulica en mecánica en una turbina hidráulica . . . . .	42

31	<b>Figura 31:</b> <i>Eje de soporte de un rodete para turbina Francis horizontal en el cual se coloca el rodete . . . . .</i>	43
32	<b>Figura 32:</b> <i>Principio funcionamiento de un sello mecánico . . . . .</i>	45
33	<b>Figura 33:</b> <i>Dibujo de un sello tipo laberinto . . . . .</i>	47
34	<b>Figura 34:</b> <i>Partes que conforman el sello tipo laberinto</i>	48
35	<b>Figura 35:</b> <i>Partes que conforman el sello tipo laberinto</i>	48
36	<b>Figura 36:</b> <i>Conjunto del cojinete principal de una turbina Francis horizontal . . . . .</i>	50
37	<b>Figura 37:</b> <i>Conjunto del cojinete principal de una turbina Francis horizontal . . . . .</i>	51
38	<b>Figura 38:</b> <i>Vista superior de la base del pedestal en la cual se fija la base del cojinete. . . . .</i>	52
39	<b>Figura 39:</b> <i>Verificación de la nivelación de la base del cojinete una vez que se instala en la base del pedestal</i>	53
40	<b>Figura 40:</b> <i>Cojinete de deslizamiento . . . . .</i>	54
41	<b>Figura 41:</b> <i>Partes que conforman el sello tipo laberinto</i>	55
42	<b>Figura 42:</b> <i>Montaje de un cojinete axial en su posición de trabajo y superficie de contacto entre el cojinete radial y axial . . . . .</i>	56
43	<b>Figura 43:</b> <i>Implementación de un sistema de bombeo y reservorio . . . . .</i>	58
44	<b>Figura 44:</b> <i>Cojinete principal de la turbina, cerrado y listo para funcionar. . . . .</i>	59
45	<b>Figura 45:</b> <i>Tipos de mantenimiento aplicados en el sector de la industria. . . . .</i>	63
46	<b>Figura 46:</b> <i>Análisis de las causas del desgaste de materiales . . . . .</i>	66
47	<b>Figura 47:</b> <i>Posición de la diferencia de medida en un sistema agujero único (Piñeiros, 2023) . . . . .</i>	69
48	<b>Figura 48:</b> <i>Posición de la diferencia de medida en un sistema eje único (Piñeiros, 2023) . . . . .</i>	70
49	<b>Figura 49:</b> <i>Designación de la posición de la tolerancia según ISO 286-2010 (Ingeniería y diseño de maquinaria industrial, 2025) . . . . .</i>	73

50	<b>Figura 50:</b> Interpretación técnica para definir el tipo de ajuste en base a la tolerancia seleccionada según ISO 286-2010 (Ingeniería y diseño de maquinaria industrial, 2025) . . . . .	73
51	<b>Figura 51:</b> Calibrador de láminas utilizado para medir holguras y calibración de elementos de máquinas (Grainger, 2025) . . . . .	75
52	<b>Figura 52:</b> Reloj comparador en centésimas de milímetro y sus partes (Stefanelli, 2025) . . . . .	75
53	<b>Figura 53:</b> Comprobación de la holgura mediante calibrador de láminas en uno de los apoyos . . . . .	76
54	<b>Figura 54:</b> Comprobación de la holgura en uno de los apoyos mediante reloj comparador . . . . .	77
55	<b>Figura 55:</b> Utilización de una lámina calibrada de 0,05 mm en uno de los apoyos del generador . . . . .	78
56	<b>Figura 56:</b> Comprobación del nivel de la base, utilizando un nivel de precisión . . . . .	78
57	<b>Figura 57:</b> Tipos de desalineamiento (y Generadores, 2025) . . . . .	79
58	<b>Figura 58:</b> Proceso de verificación de la alineación con equipo laser de un conjunto turbina generador en la zona de acoplamiento de los dos equipos . . . . .	80
59	<b>Figura 59:</b> Comprobación de la alineación y nivelación del conjunto turbina-generador . . . . .	81
60	<b>Figura 60:</b> Medición de vibraciones en el cojinete del generador lado del volante . . . . .	82
61	<b>Figura 61:</b> Parte de un informe de análisis de vibraciones de un grupo generado de 385 KVA, Hidroimbabura (González, 2021) . . . . .	83
62	<b>Figura 62:</b> Desgaste interno de una turbina Francis horizontal de 250 KW . . . . .	84
63	<b>Figura 63:</b> Holgura entre corona del rodete y anillo frontal de la turbina, valor de 0,20 mm recomendable . . . . .	85
64	<b>Figura 64:</b> Desgaste en un rodete turbina Francis horizontal . . . . .	86

65	<b>Figura 65:</b> <i>Proceso de reconstrucción de un rodete con material polímero de relleno y capa final con polímero tipo cerámico . . . . .</i>	87
66	<b>Figura 66:</b> <i>Reconstrucción de los álabes de un rodete con soldadura y proceso de balanceo dinámico . . . . .</i>	88
67	<b>Figura 67:</b> <i>Reconstrucción del anillo, álabes y otros elementos internos con material polímero de relleno y recubrimiento final durante un proceso de mantenimiento anual . . . . .</i>	89
68	<b>Figura 68:</b> <i>Proceso de montaje del rodete en el eje de la turbina utilizando las herramientas específicas para el equipo . . . . .</i>	90
69	<b>Figura 69:</b> <i>Cambio de sellos de los álabes directrices y engrase, para prevenir fugas de aguas . . . . .</i>	92
70	<b>Figura 70:</b> <i>Proceso de preparación previo al cambio de los bujes en las tapas frontal y posterior, en el taller mecánico . . . . .</i>	93
71	<b>Figura 71:</b> <i>Medición de la holgura axial con calibrador de láminas, debe ser uniforme en su contorno . . . . .</i>	94
72	<b>Figura 72:</b> <i>Medición del espesor del cojinete para definir la holgura axial . . . . .</i>	95
73	<b>Figura 73:</b> <i>Medición de la distancia entre la parte frontal del cojinete radial y disco del eje . . . . .</i>	95
74	<b>Figura 74:</b> <i>Medición de holguras axial entre el anillo del eje y cara axial del cojinete radial, zona media del cojinete . . . . .</i>	96
75	<b>Figura 75:</b> <i>Proceso de mantenimiento de un cojinete axial y radial . . . . .</i>	98
76	<b>Figura 76:</b> <i>Sello mecánico tipo laberinto . . . . .</i>	102
33	<b>Figura 33:</b> <i>Diagrama funcional de un regulador centrífugo de esferas girantes (Pacheco, 2019) . . . . .</i>	105
34	<b>Figura 34:</b> <i>Diagrama funcional de un regulador centrífugo de esferas girantes (Pacheco, 2019) . . . . .</i>	106
35	<b>Figura 35:</b> <i>Regulador de velocidad mecánico-hidráulico del grupo G2 de la central hidroeléctrica Hidrocarolina . . . . .</i>	107

36 **Figura 36:** *Regulador de velocidad de tipo electrohidráulico y control automático . . . . .* 108

# Índice de tablas

1	<i>Datos básicos para el cálculo de la Central Hidroeléctrica Buenos Aires (Velasco Morillo, 2023)</i> . . . . .	21
2	<i>Cálculos hidráulicos de la tubería.</i> . . . . .	22
3	<i>Equivalencias entre unidades de presión.</i> . . . . .	28
4	<i>Suggested running clearances (Holguras de funcionamiento sugeridas) (H. &amp; Hirani, 2000)</i> . . . . .	97
5	<i>Datos Generacion de central hidroeléctrica</i> . . . . .	115
6	<i>Ejemplo de cronograma de mantenimiento mensual</i> .	116
7	<i>Datos técnicos de Central Hidroelectrica</i> . . . . .	117
8	<i>Presupuesto de gastos</i> . . . . .	120
9	<i>Enseres Menores</i> . . . . .	121
10	<i>Respuestos, accesorios y equipo electrico</i> . . . . .	122
11	<i>Combustible y Lubricantes</i> . . . . .	122
12	<i>Presupuesto de servicios básicos de la central hidroeléctrica</i> . . . . .	123
13	<i>Presupuesto de contratos de asesoría técnica de la central hidroeléctrica</i> . . . . .	123

# Índice de ecuaciones

1	Conversión de presiones . . . . .	27
3	Valor de la tolerancia de la pieza . . . . .	68
4	Diferencia superior respecto a la medida nominal . . . . .	68
5	Diferencia inferior respecto a la medida nominal . . . . .	68
6	Desviación superior del eje . . . . .	70
7	Desviación inferior del eje . . . . .	70
8	Desviación superior del agujero . . . . .	71
9	Desviación inferior del agujero . . . . .	71
10	Tolerancia del eje . . . . .	71
11	Tolerancia del agujero . . . . .	71



# Introducción

En varias provincias del Ecuador encontramos pequeñas centrales hidroeléctricas que, según el Reglamento Sustitutivo para la Regulación del Servicio Público de Electricidad y otras disposiciones emitidas por la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR), son aquellas que tienen una potencia inferior a 10 MW. Estas centrales fueron el inicio para suministrar energía eléctrica a las ciudades y contribuir al desarrollo de la zona. Estas centrales son públicas o privadas, en este último caso, para optimizar los costos de operación y mantenimiento, disponen de personal que se ha formado en la práctica y no cuentan con una formación académica especializada. Su estructura operativa no cuenta con un personal mínimo de mantenimiento. La idea de redactar este libro se basa en una amplia experiencia profesional de varias décadas como docente en la Universidad Técnica del Norte, en la ciudad de Ibarra, Ecuador, y en el campo de la ingeniería mecánica aplicada a pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), con el objetivo de que los operadores adquieran conceptos, comprendan el funcionamiento de los equipos que operan y aprendan sobre la importancia del mantenimiento de estas pequeñas centrales para preservar su funcionamiento óptimo a lo largo del tiempo. Este libro aborda el funcionamiento de los diversos sistemas mecánicos presentes en

un equipo de generación hidráulica, específicamente en la turbina, y proporciona las herramientas necesarias para mejorar la eficiencia en la producción de energía y optimizar el uso del recurso hídrico. Sin embargo, no se profundiza en el tema del generador acoplado a la turbina, ni se abordará el asunto del transformador elevador de la subestación, dado que son temas de naturaleza eléctrica y específica. La comprensión del funcionamiento de las máquinas promueve una mayor atención hacia la inspección periódica, la lubricación de los componentes rotativos y el monitoreo del desgaste, entre otros aspectos esenciales. De esta forma, se pretende generar una cultura técnica orientada al mantenimiento, con énfasis en la confiabilidad y el rendimiento de los equipos de generación en pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH).



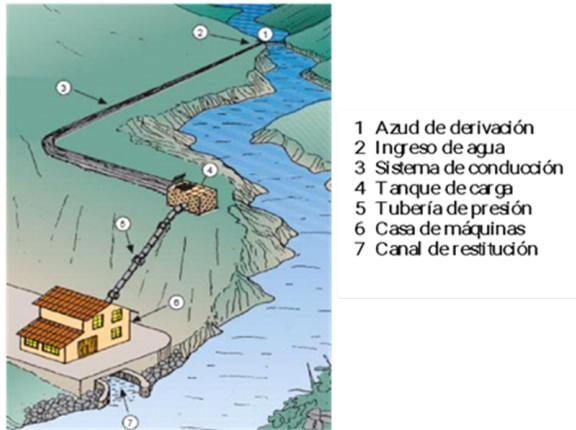
# Capítulo 1

*Obras de toma y conducción*

## 1.1 Introducción

### Figura 1:

*Diagrama esquemático de una central hidroeléctrica (T. et al., 2025)*



*Nota: Figura tomada de (T. et al., 2025)*

Se inicia con un esquema general de cómo se puede aprovechar el agua de un río para una central hidroeléctrica. La Figura 1 nos ilustra que, el agua captada en el río se conduce por un canal hacia el desarenador. Luego, el agua va al tanque de presión y por medio de una tubería llega el agua a los equipos de la casa de máquinas para su funcionamiento. Entre el tanque de carga y la casa de máquinas existe un desnivel, denominado altura neta de caída, que, junto al caudal de agua conducido, se utilizan para calcular la potencia y la energía a producir. El agua turbinada en el proceso se reintegra al cauce del río.

Esta infraestructura, que forma parte de una central hidroeléctrica, se compone de obras civiles diseñadas para captar y conducir el agua de acuerdo con parámetros técnicos de diseño, los cuales se analizan a continuación.

### **1.1.1 Captación**

La captación (Figura 2), cumple la función de retener un caudal definido de agua de un río, por lo que su diseño y construcción es de hormigón armado.

Esta infraestructura (Figura 3) está conformada por una pantalla de concreto, la cual se denomina azud de derivación, en uno de sus extremos se instala una compuerta con la finalidad de evacuar los sedimentos gruesos que puedan acumularse delante del azud. Esta compuerta recibe el nombre de compuerta de limpieza del azud.

## **Figura 2:**

*Vista general de la captación de la central hidroeléctrica Hidrocarolina*



*Nota: Elaboración Propia*

El agua captada ingresa a un canal de conducción, para lo cual existen varios tipos de diseño, siendo el más común el de colocar una rejilla lateral aguas arriba del azud, cercano a la compuerta de limpieza. La rejilla (Figura 4), está construida con marcos metálicos angulares y pletinas separadas, sus dimensiones se calculan en función del caudal a ser captado del río. También cumple la función

### Figura 3:

*Partes principales de la captación de la central hidroeléctrica Hidrocarolina*



*Nota: 1) zud de derivación, 2) Compuerta de limpieza y 3) Rejilla lateral de ingreso; Elaboración Propia.*

Para el izamiento de la compuerta se implementan varios tipos de mecanismos utilizando engranes, que transforman el movimiento de rotación en lineal y el diseño del mecanismo permite multiplicar la fuerza aplicada a la entrada.

### **Figura 4:**

*Rejilla lateral para el ingreso del flujo de agua a la línea de conducción*



*Nota: Elaboración Propia*

En la (Figura 5) se muestra un tipo de mecanismo de izamiento utilizado para trabajos de limpieza o desvío del río, el cual emplea diversos tipos de engranes.

### **Figura 5:**

*Mecanismo de izaje de una compuerta.*



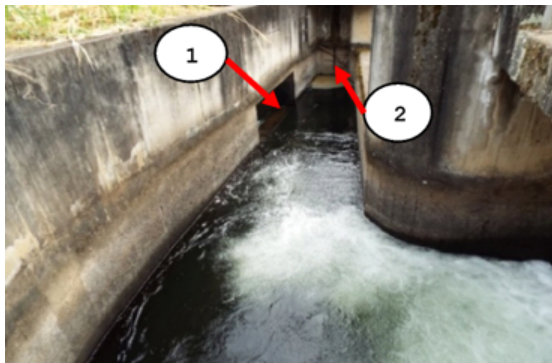
*Nota: Se coloca una manivela en el eje del engrane motriz (1), para el accionamiento; Elaboración Propia*

### 1.1.2 Canal de conducción inicial o desripiador

El agua captada del río ingresa a un canal denominado desripiador, (Figura 6), el cual conduce el flujo de manera directa hacia un tanque desarenador. Las dimensiones de este canal están determinadas en función del caudal de diseño, basado en el estudio hidrológico de la cuenca hidrográfica de la zona. En este canal ingresa material particulado con un tamaño inferior a 10 milímetros, el cual es arrastrado por el flujo del río y no es retenido en la rejilla de captación. Dentro del desripiador, se lleva a cabo un proceso de decantación, permitiendo la sedimentación de dicho material, mientras que el agua con menor contenido de sólidos es conducida hacia el tanque desarenador a través del canal de conducción.

#### Figura 6:

*Canal desripiador*



*Nota: El ingreso de agua al desarenador es por la zona 1 y la limpieza del material particulado es por la compuerta de la zona 2, Elaboración propia*

Para la evacuación del material sedimentado en el desripador (Figura 7), se emplea un mecanismo de compuerta accionado manualmente mediante un sistema de engranajes con tornillo sin fin. Este mecanismo es operado a través de una manivela que permite el izamiento y descenso de la compuerta, facilitando así la eliminación de los sedimentos acumulados en el sistema.

**Figura 7:**

*Accionamiento del mecanismo de izaje o cierre de la compuerta del desarenador para desalojar material particulado*



*Nota: Elaboración Propia*

### **1.1.3 Tanque desarenador**

El tanque desarenador o sedimentador (Figura 8 y 9) está diseñado para retener partículas sólidas arrastradas por el flujo de agua, tales como arena y otros o sedimentos que no fueron decantadas en

el desripador. Estos sedimentos son los principales causantes de la turbidez del agua, y su retención es esencial para evitar el desgaste en algunos elementos de la turbina.

**Figura 8:**

*Vista general de un desarenador horizontal*



*Nota: Elaboración Propia*

Los parámetros principales de diseño para calcular la longitud y ancho de un desarenador son:

- Tamaño de partícula a sedimentar, el cual se determina basándose en estudios técnicos de sedimentación.
- Definir la velocidad de sedimentación de la partícula.
- Definir la velocidad del agua.

## Figura 9:

*Vista general de un desarenador horizontal luego del proceso de limpieza*



*Nota: (1) geometría hidráulica basándose en los parámetros de diseño de un desarenado, (2) vertedero de excesos; Elaboración Propia.*

Un diseño eficiente del tanque desarenador permite retener la mayor cantidad de sedimentos, evitando así inconvenientes en la línea de conducción y protegiendo los equipos hidromecánicos de la central hidroeléctrica del desgaste abrasivo. Para llevar a cabo la limpieza del desarenador, se utiliza una compuerta lateral (Figura 10), la cual se opera controlando el caudal de ingreso del agua desde la captación. Gracias al diseño hidráulico de la estructura, esto permite evacuar los sedimentos por un canal y conducirlos aguas abajo del azud de manera simultánea.

**Figura 10:**

*Compuerta de limpieza del desarenador*



*Nota: Elaboración Propia*

El sistema de desarenado dispone de dos vertederos (Figura 11): uno en la parte lateral que cumple la función de control de caudal y, otro en la dirección del canal de conducción que permite el paso del caudal de agua requerida para el funcionamiento de los equipos hidromecánicos.

## Figura 11:

*Vista del vertedero de ingreso de agua al canal de conducción*



*Nota: (1) Vertedero por el cual fluye el agua que pasa por el desarenador y es la que conecta al canal de conducción hacia el tanque de carga, Elaboración Propia.*

El agua con menor número de partículas disueltas continúa su trayecto hasta el tanque de carga. El canal que conecta ambos puntos debe tener una pendiente adecuada para garantizar que las partículas, más pequeñas que las del diseño del desarenador, sean arrastradas sin facilidad. Esto evita la acumulación de sólidos en esta zona de la conducción.

### 1.1.4 Tanque de Carga

También conocido como tanque de presión, el diseño de esta obra civil es específico para cada central hidroeléctrica, y no se aborda en detalle en el presente análisis.

**Figura 12:**

*Vista general del tanque de presión para una central hidroeléctrica.*

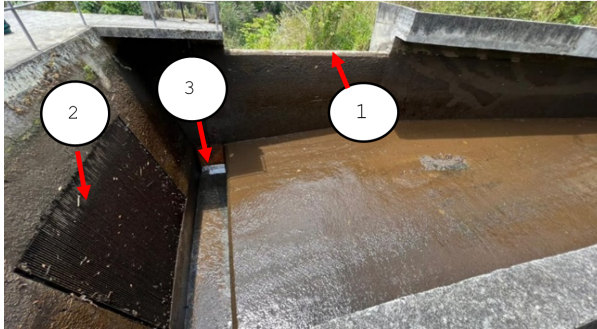


*Nota: Elaboración Propia*

Se construye en hormigón armado y su geometría está diseñada para retener algunos sólidos en suspensión que, debido a su tamaño, no fueron retenidos en el desripador (Figura 1. 12). Además, constituye un punto de referencia crucial para supervisar la altura del nivel del agua, estrechamente relacionada con el caudal de ingreso y consumo de los equipos hidromecánicos de la central hidroeléctrica.

### Figura 13:

*Zona final del tanque de presión.*



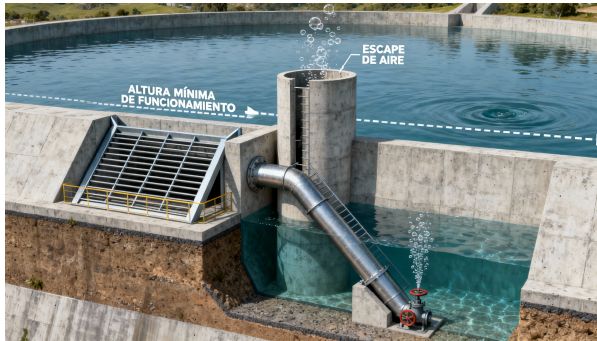
*Nota: (1) Vertedero de excedentes de agua (2) Rejilla de ingreso de agua a la tubería de presión (3) Compuerta de limpieza o de fondo; Elaboración Propia.*

De no consumir la totalidad del agua que está ingresando, el excedente pasa por un vertedero lateral. Para los trabajos de limpieza y vaciado del tanque se dispone de una compuerta cercana al vertedero, también conocida como compuerta de fondo (Figura 13).

En relación con la altura de agua en el tanque; se debe considerar el nivel del agua que se debe mantener respecto a la parte superior de la tubería de presión, tal como se muestra en la Figura 14. Este control de altura evita la generación de remolinos, los cuales pueden provocar la entrada de aire a la tubería, afectando la eficiencia de la turbina. Esta altura se define como la altura mínima de funcionamiento. (Arechua de la Cruz, 2018) (Ortiz Flórez et al., 2017)

## Figura 14:

*Relación Tanque de carga y Tubería de presión.*



*Nota: Elaboración Propia*

El volumen del tanque de carga es definido por el diseñador (Figura 12), considerando un volumen de reserva. Esto permite que, ante las variaciones de caudal en el río, la potencia de funcionamiento no fluctúe. En caso de que la altura disminuya, el operador puede controlar oportunamente los parámetros de funcionamiento de los equipos hidromecánicos.

Además, el volumen de agua contenido en este tanque desempeña una función crucial en la amortiguación del fenómeno conocido como golpe de ariete. Basándose en principios físicos, se establece que el agua, al estar en un punto de referencia más elevado que la casa de máquinas, tiene acumulada una energía potencial.

En esta zona, el agua alcanza una velocidad baja, antes de ser conducida a una tubería dependiente pronunciada, cuya parte final

se conecta a los equipos hidromecánicos. Para evitar el ingreso de partículas extrañas mayores a los 3 mm, se coloca una rejilla metálica conformada por un perfil angular como marco y platinas espaciadas.

La cámara de transición, que se forma entre el tanque de carga y la tubería de presión (Figura 14), conocida como chimenea de equilibrio, cumple la función de vía de escape para el aire que puede generarse debido al cierre brusco de la válvula principal en el cuarto de máquinas o durante el proceso de llenado de la tubería de presión.

**Figura 15:**  
*Tanque de carga*



*Nota: Elaboración Propia*

En resumen (Figura 15), el tanque de carga cumple con las siguientes funciones:

- Crear un volumen de reserva de agua que permita a los equipos hidromecánicos operar a una potencia seleccionada sin fluctuaciones.

- Disponer de un volumen que amortigua el golpe de ariete, originado por paradas bruscas.
- Mantener una altura de agua suficiente sobre la tubería para evitar el ingreso de aire.
- Decantar materiales sólidos en suspensión y permitir su lavado.
- Impedir la entrada de elementos sólidos arrastrados y flotantes en la tubería de presión.
- Definir la altura mínima de funcionamiento.

### **1.1.5 Tubería de presión**

Es el medio por el cual se moviliza el agua desde el tanque de carga hasta la casa de máquinas, lugar en el cual se acopla a los equipos hidromecánicos. Entre el tanque de carga y la casa de máquinas existe una diferencia de niveles de altura, que, dependiendo de la topografía de la zona, se genera una pendiente, por la cual se coloca dicha tubería, (Figura 16 y 17). Como parámetros de selección de una tubería de presión se consideran:

- Tipo de material: acero, poliéster con recubrimiento de fibra de vidrio (GRP), entre las principales.
- Espesor: el espesor de la tubería se determina con base en el golpe de ariete y se corrobora su elección comprobando si su

tensión máxima permisible es mayor que las tensiones ejercidas sobre él.(Farinango & Rigoberto, 2013) y (Castillo, 2010)

- Diámetro: Para el cálculo se consideran factores como la potencia, altura neta de caída, caudal, pérdidas por fricción, entre los principales.

**Figura 16:**

*Montaje de la tubería de presión tipo GRP desde el tanque de carga a cuarto de máquinas , altura neta 65 m.*



*Nota: Elaboración Propia*

**Figura 17:**

*Brida final de la tubería de presión para conectar con la tubería principal que va hacia la turbina*



*Nota: Elaboración Propia*

Para garantizar su estabilidad, durante el trayecto se diseñan y construyen varios sistemas de anclaje como soporte, (Figura 1.18). Un resumen básico de la información para las obras civiles, Tabla 1, la misma que corresponde al proyecto hidroeléctrico la Merced de Buenos Aires, de propiedad de la Empresa Eléctrica Regional Norte EMELNORTE de la provincia de Imbabura (Castillo, 2010)

**Figura 18:**

*Sistemas de anclaje de la tubería de presión que va desde el tanque de carga a casa de máquinas*



*Nota: Elaboración Propia*

**Tabla 1**

Datos técnicos de diseño del proyecto hidroeléctrico de la Merced de Buenos Aires (Velasco Morillo, 2023).

**Tabla 1:**

*Datos básicos para el cálculo de la Central Hidroeléctrica Buenos Aires (Velasco Morillo, 2023)*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Cota de espejo de agua	2160,830 msnm
Cota de entrada de la tubería	2157,600 msnm
Cota de espejo de agua (Estiaje)	2159,420 msnm
Cota de plataforma de operaciones	2086,000 msnm
Caudal de diseño	1,800 m <sup>3</sup> /s
Longitud desarrollada de la tubería	1540,000 m
Desnivel físico existente	74,830 m
Diámetro de la tubería	1000 mm
Rugosidad absoluta del tubo	0,030 mm
Viscosidad cinemática del agua (14°C)	0,000001240 m <sup>2</sup> /s
Viscosidad cinemática del agua (8°C)	0,000001387 m <sup>2</sup> /s

*Nota: Elaboración a partir de (Velasco Morillo, 2023)*

**Tabla 2:***Cálculos hidráulicos de la tubería.*

CALCULOS HIDRAULICOS				
Fórmula de Prand Colebrook		Área Tubo	0,785398163	m <sup>2</sup>
		Gradiente H	0,04859	m/m
		Raíz	308,76425	
		F1	1,12752E-05	
		F2	8,08625E-06	
Capacidad de flujo		Caudal (Q)	2285,86	L/s
		Caudal diseño	1800,00	L/s
		Velocidad	2,292	m/s
CALCULO DE PERDIDAS DE CARGA EN LA TUBERÍA				
		Redondeada C=	0.8	
Pérdida en entrada tubería		he	0,212	m
Pérdida en salida tuberíaa		hs	0,265	m
Pérdida por rozamiento		Reynolds	1652365,67	
		Rug. Relativa	0,000030	
		Coef. Resist.	0,014882	
		hr	6,073	m
Pérdida por accesorios		Codos de 90 °	5	0,66
		Codos de 45 °	60	3,18
		Perdida en total en el sistema	10,393	m
Carga dinámica Total 64,44 m				

*Nota: Elaboración Propia*

En esta primera parte se detallaron las obras civiles, que permiten el transporte del agua desde el punto de captación en el río hasta

la casa de máquinas, (Figura 19). Estas estructuras son diseñadas en función del caudal de diseño. Para el trazado y la ubicación de las obras, es fundamental realizar un estudio topográfico previo que defina las cotas del lugar donde se construirán tanto las obras principales como las complementarias. Estas últimas son esenciales para el retorno de excedentes de agua en la conducción y para llevar a cabo trabajos de mantenimiento y limpieza.

**Figura 19:**

*Conexión entre la brida final de la tubería de presión y una turbina Francis horizontal en la casa de máquinas*



*Nota: Elaboración Propia*

# Capítulo 2

*Equipos Hidromecánicos*

## 2.1 Introducción

En este capítulo se analizará el equipo hidromecánico, encargado de transformar la energía hidráulica en energía mecánica, con un enfoque en una turbina de tipo Francis horizontal de 250 Kw (Figura 20). El proceso de selección se realiza en función del caudal de agua y la altura neta de caída. Comprender su funcionalidad es fundamental para establecer las acciones de mantenimiento que se deben adoptarse.

### Figura 20:

*Equipos electromecánicos de la pequeña central hidroeléctrica Hidrocarolina de 250 Kw*



*Nota: Elaboración Propia*

En pequeñas centrales hidroeléctricas, se observa que algunos equipos son reconstruidos, mientras que otros son nuevos; la diferencia radica principalmente en la eficiencia y tecnología utilizada para su operación. Es común escuchar el término “eficiencia de la turbina”, que se refiere a la relación entre la potencia calculada y la

potencia de funcionamiento. La disminución de la potencia se debe a las pérdidas que se producen en los elementos que conforman la turbina hidráulica y, de alguna manera, está relacionada con el diseño, materiales y desgaste, entre los principales. Con el transcurso del uso de los equipos, se experimenta un desgaste de varias piezas, lo cual tiene un impacto en la eficiencia de la turbina, por lo tanto, se debe analizar las causas y, en el menor tiempo, minimizarlas, aplicando técnicas de mantenimiento. Al final de la tubería de presión, antes del ingreso del agua a la turbina en la casa de máquinas, se ubica una válvula de control de flujo denominada válvula principal. Al abrir esta válvula, el agua comienza a moverse a alta presión, iniciando así la transformación de la energía hidráulica en mecánica.

### **2.1.1 Central Hidroeléctrica**

Una central hidroeléctrica aprovecha un caudal definido de agua de un río. Al ser conducida desde dos niveles diferentes, la velocidad del agua aumenta y al ingresar a una turbina, se genera el movimiento de un eje, el cual, si se acopla a un alternador, produce energía eléctrica. La producción de energía eléctrica generada se determina en función de la potencia de los equipos, siendo su unidad de medida el vatio, W, Kilovatio, Kw, Megavatio, Mw u otra unidad superior. Estas unidades permiten cuantificar la capacidad de generación de una instalación y su información sirve para la planificación del man-

tenimiento, ya que permite evaluar la eficiencia de los equipos. El Plan Maestro de Electrificación 2009 – 2020 de Ecuador clasifica a las centrales hidroeléctricas en función de su potencia instalada. En el caso de pequeñas centrales hidroeléctricas, se encuentran las que tienen una potencia instalada superiores a 500 Kw y menores o iguales a 10 Mw (Mantilla, 2017). Un término adicional que se utiliza en los sistemas de generación es la presión, por lo que es importante conocer las equivalencias de presión en varias unidades de medida, según se indica en la Tabla 3. Dado que la diferencia entre algunas unidades es tan pequeña, a efectos prácticos, se tiene la siguiente relación, como se muestra en la ecuación 1:

$$1 \text{ atm} = 1 \text{ bar} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 10 \text{ mca} = 100 \text{ KPS} \quad (1)$$

**Tabla 3:***Equivalencias entre unidades de presión*

Unidad	atm	bar	Kg/cm <sup>2</sup>	mca	PSI	KPa (SI)
1 atmósfera	1	1.013	1.033	10.333	14.696	101.325
1 bar	0.987	1	1.020	10.197	14.504	100
1 kg/cm <sup>2</sup>	0.968	0.981	1	10	14.223	98.067
1 metro columna de agua	0.097	0.098	0.100	1	1.422	9.806
1 libra por pulgada <sup>2</sup>	0.068	0.069	0.070	0.703	1	6.895
1 kilopascal (SI)	0.010	0.010	0.010	0.102	0.145	1

*Nota: Elaboración Propia*

### 2.1.2 Equipos hidromecánicos

Se trata de los elementos que conforman un grupo generador de una central hidroeléctrica; tales como la válvula principal, ubicada en la parte final de la tubería de presión, la turbina y la zona de restitución del agua turbinada.

#### 2.1.2.1. Válvula principal o de guarda

Es un dispositivo que se emplea para controlar el flujo de un fluido. Existen diversos tipos y su selección depende del diámetro de la tubería, tipo de unión, presión de trabajo, entre otros factores principales. La válvula tipo mariposa es la más utilizada debido a su facilidad de operación y a esta se le pueden instalar sistemas de accionamiento motorizado.

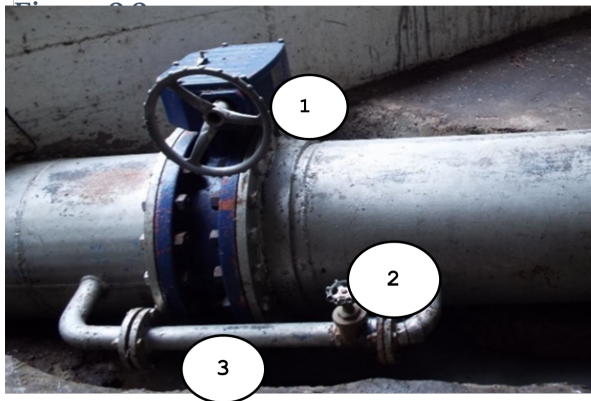
El diámetro interno de una tubería se denomina diámetro nominal, DN. Si se expresa en milímetros se utiliza la sigla **DN** seguida del valor del diámetro nominal. Para definir en pulgadas, se utiliza la sigla **NPS**, por ejemplo, DN 1000 es una válvula de diámetro nominal de 1000 mm, su diámetro nominal equivalente en pulgadas sería NPS 40.

Para especificar la presión máxima que puede soportar una válvula, se emplea la sigla **PN** seguido del valor de la presión en bar. Una válvula PN 16, es una válvula que soporta 16 bar (S. L. Belgicast Internacional, 2012).

Para la apertura de la válvula principal, es necesario igualar las presiones entre la tubería de presión y la tubería que conecta a la turbina (Figura 21). Esto se logra instalando una tubería tipo bypass entre ambas, la cual está equipada con una válvula adicional que permite el flujo de agua para compensar la diferencia de presión.

## Figura 21:

*Sistema bypass para compensación de presiones previa a la apertura de la válvula principal*



*Nota: Nota: (1) Válvula tipo mariposa. (2) Válvula de compuerta. (3) Tubería by pass; Elaboración Propia.*

Si la válvula principal cuenta con un sistema motorizado, es crucial controlar la velocidad de cierre para evitar el golpe de ariete que puede ocurrir ante un cierre brusco. El control adecuado del cierre permite reducir la presión súbita en la tubería, protegiendo el sistema de daños estructurales.

### **2.1.3 Turbina hidráulica tipo Francis horizontal**

Se define como una turbomáquina que aprovecha la velocidad del agua como fluido de trabajo, el cual ingresa a través de una cámara espiral, la cual direcciona el flujo de forma radial hacia el rotor, como se muestra en la Figura 22. Para controlar y direccionar el flujo de agua hacia el rotor, se dispone de un grupo de álabes directrices

en el distribuidor. El agua que sale del rotor es conducida al tubo de aspiración (codo de descarga) y luego es descargada al canal de desfogue, también denominado canal de restitución (Velasco Morillo, 2023).

La potencia teórica de la turbina puede calcularse utilizando los datos de altura (caída neta) y caudal. Para ello, se aplica la siguiente ecuación (Farinango & Rigoberto, 2013):

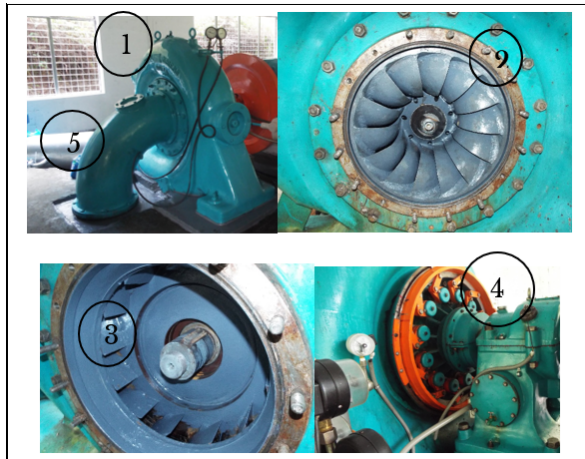
$$P_r = 9,81 n_t n_g Q H_R \quad (2)$$

Dónde:

- $H_R$  = caída neta, m
- $n_t$  = eficiencia de la turbina
- $n_g$  = eficiencia del generador
- $Q$  = caudal del diseño, m<sup>3</sup>/s
- $P_r$  = potencia teórica, kW

## Figura 22:

*Ingreso de agua al rotor por la cámara espiral, sistemas de alabes del distribuidor y codo de descarga del agua turbinada*



*Nota: 1 Cámara espiral, 2 Rotor o rodete, 3 Álabes directrices del distribuidor, 4 Mecanismo de accionamiento álabes directrices, 5 Tubo de aspiración o codo de descarga; Elaboración Propia.*

En lo que respecta a las eficiencias, se realizó un análisis del proyecto hidroeléctrico La Merced de Buenos Aires, ubicado en la provincia de Imbabura. Se constató que los equipos tenían una eficiencia del 94 % para la turbina y del 90 % para el generador. Estos valores de eficiencia fueron proporcionados por el fabricante, y como parte de la garantía, deben constar explícitamente en los términos del pedido, asegurando que los equipos cumplan con los estándares de rendimiento establecidos.

Los valores de eficiencia de un equipo turbina-generador están

directamente relacionados con el costo, debido al uso de mejores materiales y diseño optimizado que permite reducir las pérdidas de energía. Sin embargo, una mayor eficiencia también implica una operación más rentable a largo plazo, ya que maximiza la conversión de energía hidráulica en energía eléctrica.

Para la instalación de los equipos en el cuarto de máquinas, es fundamental examinar y verificar previamente que las bases de anclaje se encuentren centradas y niveladas en relación con la línea de centros de la tubería de ingreso. Esto se debe realizar utilizando instrumentos de precisión con niveles láser o teodolitos, asegurando una alineación adecuada para prevenir posibles problemas mecánicos derivados de una mala instalación.

En el proceso de selección de una turbina, el fabricante proporciona la velocidad específica y el diámetro del rodete. Con estos datos, se determina la velocidad de sincronismo en revoluciones por minuto (rpm), que es un valor importante para garantizar la compatibilidad entre la turbina y el generador. Las velocidades de sincronismo más comunes en pequeñas centrales hidroeléctricas son 600 rpm, 720 rpm, 900 rpm y 1200 rpm.

### **Figura 23:**

*Turbina Francis de 475 KW, 900 rpm, caudal 1,64 m<sup>3</sup>/seg, altura máxima de caída 38m*



*Nota: Elaboración Propia*

Durante la construcción de una turbina hidráulica, los fabricantes se enfocan en alcanzar la máxima eficiencia, por lo que es necesario conocer la función que desempeña cada uno de los componentes que integran la turbina para garantizar un adecuado proceso de mantenimiento, ya que permite identificar posibles puntos de desgaste o fallo y actuar de manera preventiva.

En la Figura 23 se puede observar una turbina Francis de 475 kW, donde cada elemento está diseñado para optimizar el aprovechamiento de la energía hidráulica y asegurar un funcionamiento eficiente.

### 2.1.3.1. Carcaza o caracol

Es el punto de entrada del fluido en movimiento a alta presión (Figura 24), que luego es dirigido hacia el rotor o rodete de la turbina. La regulación del flujo de ingreso del agua se realiza mediante la válvula principal. Dependiendo del grado de apertura de esta válvula, el rodete girará a una velocidad angular específica, logrando así una velocidad media uniforme y constante, al mismo tiempo que se consume un caudal de agua determinado. En esta fase de apertura, se busca alcanzar la velocidad nominal de la turbina.

Durante el montaje del caracol, se emplean técnicas de precisión para obtener la línea de centros del conjunto de la turbina. Esta fase es fundamental, ya que sirve como referencia para la alineación horizontal y vertical de los demás elementos de la turbina.

**Figura 24:**

*Caracol de una turbina Francis y sus álabes directrices interiores*



*Nota: Elaboración Propia*

En el caracol se instalan dos anillos: uno en la parte frontal y el otro en la parte posterior del caracol, Figura 25. Las caras de asentamiento de los anillos sobre las paredes laterales del caracol son rectificadas para un correcto montaje.

### Figura 25:

*Anillos posterior y frontal del caracol que son de referencia para el montaje de otros elementos de la turbinas*



*Nota: Elaboración Propia*

### 2.1.3.2. Distribuidor

Se instala en uno de los anillos del caracol, de acuerdo con el diseño del fabricante, puede estar ubicado en la parte frontal o posterior del mismo, Figura 26. Su función principal es guiar y controlar el flujo de agua hacia el rotor, asegurando así una entrada eficiente y adecuada del fluido en movimiento.

**Figura 26:**

*Distribuidor de una turbina Francis horizontal con sus elementos complementarios para guía y control del flujo de agua en el interior de la turbina*



*Nota: Elaboración Propia*

Los elementos que forman parte del distribuidor son los álabes móviles, que se acoplan a un mecanismo de biela, lo que permite el movimiento necesario para la apertura y cierre del conjunto (Figura 27), regulando así el flujo de agua que se dirige hacia el rotor.

## Figura 27:

*Álabes directrices en posición cerrada y su mecanismo de accionamiento*



*Nota: Elaboración Propia*

Los álabes directrices están compuestos por un eje que se apoya en los dos anillos del caracol, lo que permite disponer de un centro de rotación. El accionamiento del conjunto de álabes se lleva a cabo mediante una barra que conecta al distribuidor con el regulador de velocidad, lo que ajusta la apertura y cierre de los álabes y controla el ingreso del flujo de agua al rodete. La geometría de los álabes está diseñada para que el agua entre sin causar un impacto directo con los álabes del rotor (Figura 28).

Cuando la válvula está abierta y los álabes se encuentran en posición cerrada, el caudal de agua es mínimo, situación que se denomina sin carga. A medida que los álabes se abren, el caudal aumenta, lo que se conoce como iniciar carga. El control del flujo de agua hacia la turbina permite determinar la curva de eficiencia, aplicando una

metodología específica cuando sea necesario.

**Figura 28:**

*Posición de álabes directriz al interior del caracol y sistema de accionamiento con el regulador de velocidad de una turbina Francis*



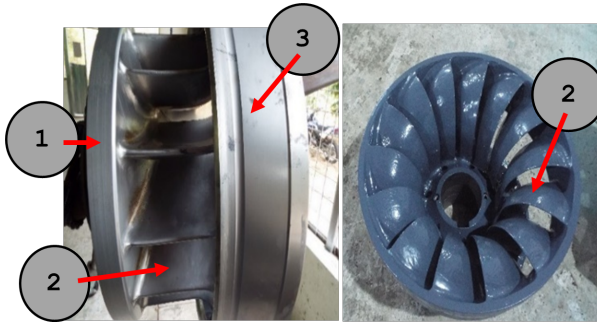
*Nota: Elaboración Propia*

Si ocurre un rechazo de carga, los álabes directrices deben cerrarse para evitar que la turbina alcance una velocidad angular excesiva que no debe superar la velocidad de embalamiento, un parámetro técnico proporcionado por el fabricante. Por esta razón, es esencial mantener el regulador en condiciones óptimas y realizar pruebas de rechazo de carga bajo supervisión, decisión que deberá considerar la persona a cargo del mantenimiento.

### 2.1.3.3. Rotor o rodete

#### Figura 29:

*Partes de un rodete*



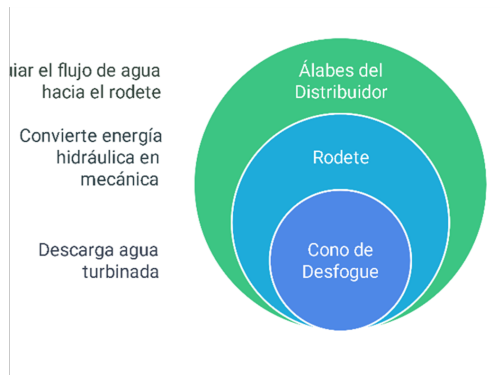
*Nota: Se observa las partes del rodete, de izquierda a derecha: (1) anillo, (2) álabes y (3) corona. En la figura derecha se observa un rodete con material polímero protector para resistir el desgaste y aumentar su vida útil; Elaboración Propia.*

Se trata de un elemento fabricado de acero de alta dureza con el fin de resistir el desgaste. Se compone de un anillo y una corona, los cuales se unen por un grupo de álabes curvos de forma equidistante, conformando así un único cuerpo (Figura 29).

El agua es guiada por los álabes del distribuidor, ingresa al rodete a través de los espacios entre sus álabes siguiendo un flujo radial, lo que provoca el giro del rodete, para luego ser expulsada por el lado de la corona en un flujo axial. El agua que sale del rodete, conocida como agua turbinada, se descarga mediante el cono de desfogue, completando el ciclo de conversión de energía hidráulica en mecánica, proceso que se resume en la Figura 30.

### Figura 30:

*Proceso de transformación de la energía hidráulica en mecánica en una turbina hidráulica*



*Nota: Elaboración Propia*

Para el diseño de un rodete, los fabricantes deben considerar los siguientes criterios: el caudal, tamaño de partículas disueltas en el agua, la altura neta de caída y la velocidad específica, entre otros factores. Un aspecto relevante son los ángulos de la curvatura de los álabes, tanto a la entrada como a la salida del flujo de agua, que influyen en la eficiencia de la turbina. El tipo de material es, por lo general, acero, con características de alta resistencia al desgaste.

Dependiendo de las horas de funcionamiento y de la cantidad de sólidos en el agua, un rodete experimenta un desgaste de tipo abrasivo, lo que provoca una pérdida de eficiencia. Este efecto se manifiesta en un incremento en el consumo de caudal de agua en comparación con las condiciones operativas iniciales.

En la Figura 31 se aprecia el eje que se utiliza para el montaje del rodete, permitiendo así la transformación del movimiento en rotacional. Por consiguiente, es fundamental asegurar una alineación precisa del eje con respecto a la línea de centro establecida en el caracol.

En el eje soporte se instalan diversos elementos complementarios que cumplen funciones esenciales, tales como el cierre de la turbina mediante un sistema de sello mecánico, el soporte del eje principal por un cojinete guía y el acople final, que facilita la transmisión del movimiento hacia el movimiento giratorio al generador. Cada uno de estos componentes es crucial para el funcionamiento eficiente del sistema.

**Figura 31:**

*Eje de soporte de un rodete para turbina Francis horizontal en el cual se coloca el rodete*



*Nota: Elaboración Propia*

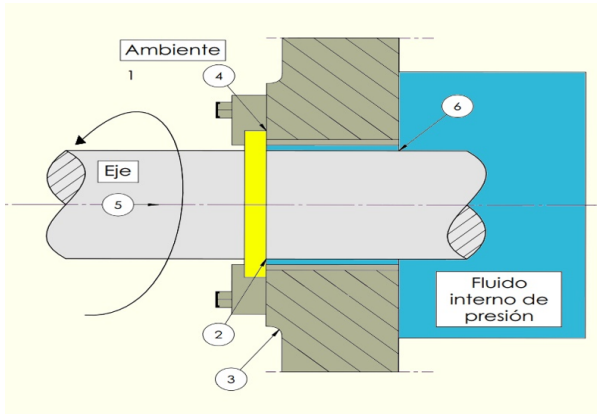
#### 2.1.3.4. Sello tipo laberinto

Los sellos mecánicos se utilizan en equipos en los cuales se requiere evitar el flujo de algún tipo de fluido de una zona interna hacia el exterior; sus aplicaciones están relacionadas con máquinas estacionarias o rotatorias. Una fuga del fluido causa inconvenientes en los procesos que afectan el trabajo normal de la máquina, llegando incluso a provocar la parada de la misma por daños en algunos elementos o en el proceso productivo (Vallés et al., 2003; Vijayaragavan et al., 2025).

El principio de sellado, representado en la Figura 32, se basa en la aplicación de una fuerza axial que permite el contacto adecuado entre dos superficies, evitando así la fuga del fluido a través del eje. Este mecanismo es fundamental para garantizar la eficiencia y fiabilidad del sistema de sellado en equipos rotativos (Caceres, 2008; de Souza Barros et al., 2019).

## Figura 32:

### *Principio funcionamiento de un sello mecánico*



*Nota: (1) Parte externa del equipo, (2) Sello mecánico, (3) Carcasa, (4) Sistema de ajuste, (5) Eje giratorio, (6) Fluido a presión en el interior del equipo; Elaboración Propia.*

Diversos tipos de sellos mecánicos se han desarrollado basándose en la función del equipo, el tipo de fluido, el tamaño, entre otros factores. En el caso de la turbina Francis analizada, se emplea un sello tipo laberinto. Este diseño obliga al agua entrante a seguir un camino intrincado entre un grupo de anillos superior e inferior, lo que provoca una pérdida de presión en el fluido durante su recorrido. Esta disminución de presión evita la contaminación del aceite del cojinete de la turbina, garantizando así su funcionamiento.

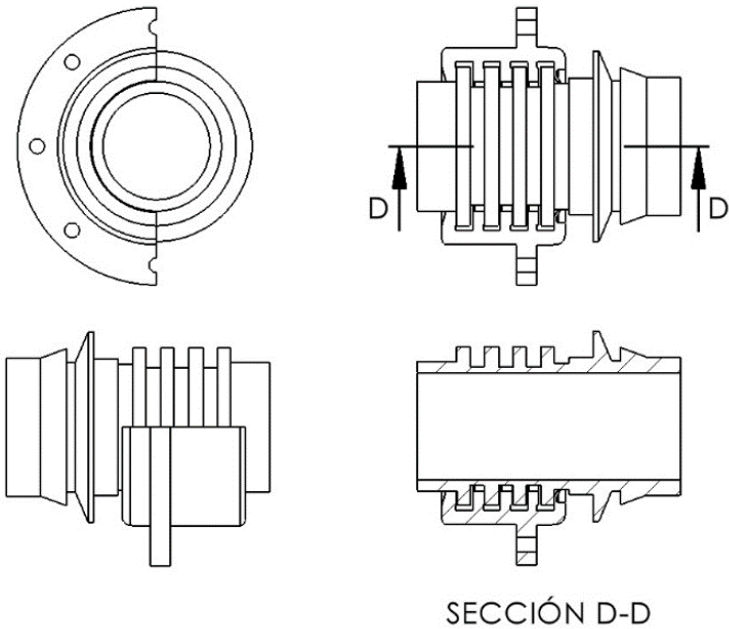
En la Figura 33 se representa el esquema de un sello tipo laberinto, en el que es posible identificar los anillos superior e inferior que lo conforman.

Este tipo de sello mecánico, denominado sello laberinto, es fabricado en bronce naval o acero inoxidable. Su función principal es prevenir el paso del agua desde el interior del caracol por el eje de la turbina. Según las condiciones de diseño, se permite un mínimo paso de agua, que pierde presión al circular por el interior del laberinto antes de ser evacuada a través de un sistema recolector.

En las Figuras 34 y 35 se observan las partes del sello y su proceso de montaje, en las que se aprecia que el cuerpo principal del sello está montado sobre el eje de la turbina, parte móvil, mientras que la parte denominada tapa de cierre, parte fija, se encuentra sujeta en la carcasa interior de la turbina. Esta disposición permite que ambas partes trabajen en conjunto, formando un solo sistema de sellado que limita la fuga de fluido a presión.

**Figura 33:**

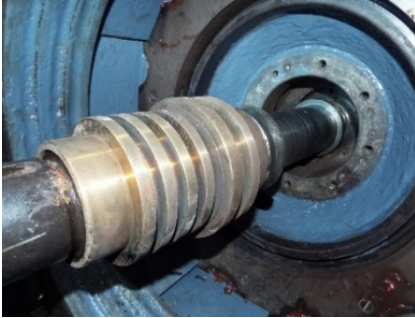
*Dibujo de un sello tipo laberinto*



*Nota: Se observa un modelo de sello tipo laberinto fabricado en bronce y tapa de cierre en hierro fundido de una turbina Francis horizontal; Elaboración Propia.*

### Figura 34:

*Partes que conforman el sello tipo laberinto*



*Nota: Elaboración Propia*

### Figura 35:

*Partes que conforman el sello tipo laberinto*



*Nota: La fase de montaje del conjunto del sello tipo laberinto. Una vez que este se ha colocado y centrado adecuadamente, se puede proceder al montaje del rodete en el eje; Elaboración Propia.*

Como consecuencia, su ajuste debe realizarse de manera periódica con el fin de prevenir fugas de agua. Asimismo, existen diversas fuentes de información que ofrecen alternativas de distintos fabricantes de sellos mecánicos, lo que facilita su selección de acuerdo con aplicaciones específicas y rangos de costos. Estos sellos pueden adaptarse en función del espacio disponible y de las condiciones de operación.

### **2.1.3.5. Cojinete guía o principal**

Se denomina cojinete principal o cojinete lado de la turbina al componente encargado de soportar las cargas radiales y axiales generadas durante el proceso de transformación de la energía cinética y de presión del agua en energía mecánica rotacional, Figura 36.

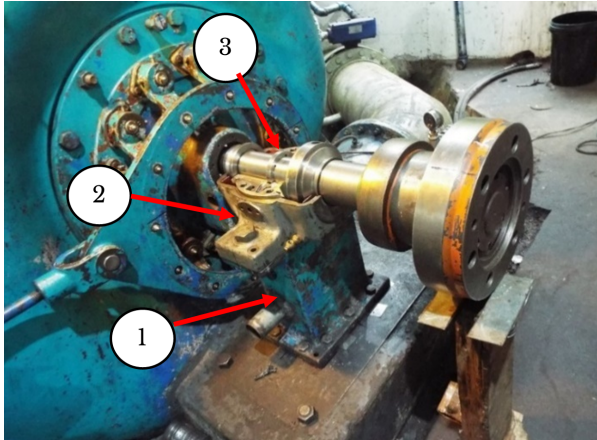
Durante el montaje, se inicia con la instalación del pedestal del cojinete, el cual se fija en una placa base sobre el suelo mediante pernos. En esta etapa se controla la nivelación, Figura 37, en relación con la placa base, asegurando que su posicionamiento esté alineado con la línea de centros del caracol de la turbina. Para este proceso de nivelación y alineación, se emplean instrumentos de precisión.

En la base superior del pedestal se encuentran dos perforaciones roscadas (1), que se utilizan para fijar la base del cojinete, tal como se observa en la Figura 38. Además, se realiza una verificación de la

nivelación al instalar la base del cojinete, Figura 39; de ser el caso, se utilizan alzas de espesor calibrado.

**Figura 36:**

*Conjunto del cojinete principal de una turbina Francis horizontal*



*Nota: El conjunto del cojinete principal, (Figura 36), está conformado por las siguientes partes: (1) base principal o pedestal, (2) la base del cojinete, (3) el cojinete principal constituida por una parte radial y una axial y las tapas del cojinete; Elaboración Propia.*

Estas piezas deben protegerse adecuadamente durante su manipulación, siendo fundamental utilizar las herramientas apropiadas para evitar deformaciones superficiales. Las superficies de contacto entre las piezas están rectificadas para asegurar un asentamiento total y preciso.

**Figura 37:**

*Conjunto del cojinete principal de una turbina Francis horizontal*



*Nota: Elaboración Propia*

Antes del ajuste final de la base al pedestal, se colocan los pasadores de posición. Estos pasadores actúan como elementos de posicionamiento entre ambas piezas, garantizando que la base permanezca en su lugar durante el ajuste final y evitar cualquier movimiento no deseado.

### **Figura 38:**

*Vista superior de la base del pedestal en la cual se fija la base del cojinete.*



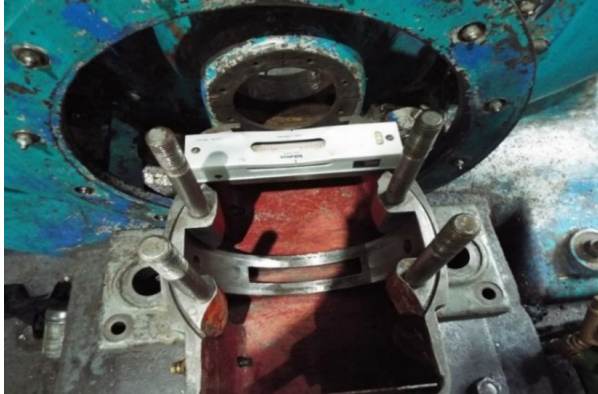
*Nota: (1) Punto de sujeción de la base del cojinete principal; Elaboración Propia.*

La base del cojinete es la estructura en la que se aloja el cojinete, y está diseñada con guías que facilitan su entrada y posicionamiento correcto, eliminando cualquier tipo de juego. Al posicionar el eje en la base, se establece un primer criterio técnico fundamental para garantizar la alineación adecuada del cojinete principal en relación con la línea de centros del caracol de la turbina.

Este tipo de cojinete es del tipo deslizamiento o fricción, diseñado para disminuir la fricción entre dos superficies en movimiento relativo. A diferencia de los rodamientos de bolas o rodillos, estos cojinetes no incorporan elementos rodantes para facilitar su movimiento (Cock, 2019).

### **Figura 39:**

*Verificación de la nivelación de la base del cojinete una vez que se instala en la base del pedestal*



*Nota: Elaboración Propia*

En este tipo de cojinetes se pueden identificar dos partes principales, Figura 40. La primera es la superficie de montaje, también conocida como superficie de soporte y se le distingue por las ranuras que tiene para el ingreso del lubricante, es la superficie que está en contacto con la base del cojinete.

La segunda es el casquillo, que es la parte que contacta con el eje en la parte superior, el montaje de la parte inferior se observa en la Figura 41.

## Figura 40:

### *Cojinete de deslizamiento*

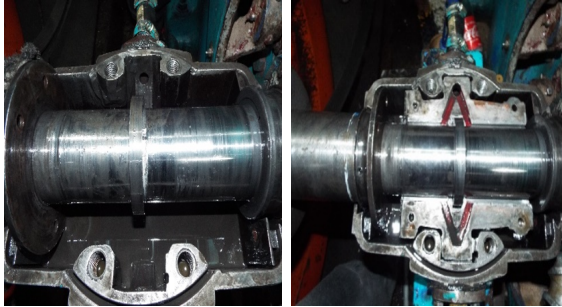


*Nota: El casquillo es de material babbit el cual es rectificado a las dimensiones recomendadas por el fabricante. Las dimensiones se determinan en función del diámetro del eje; Elaboración Propia.*

El *babbit* es un material de bajo coeficiente de fricción, lo que proporciona una superficie suave y deslizante con el eje. Otra característica fundamental es su resistencia al desgaste, así como una temperatura de fusión de mínimo 60 °C, la cual dependerá del tipo de aleación de *babbit* seleccionado.

## Figura 41:

*Partes que conforman el sello tipo laberinto*



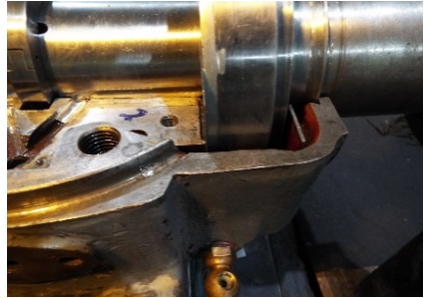
*Nota: Elaboración Propia*

Para garantizar una lubricación adecuada entre el eje y el casquillo, se incorporan varios canales o ranuras que permiten la circulación del aceite lubricante. Esto tiene como objetivo reducir la fricción, minimizar el desgaste y disipar el calor generado por el movimiento relativo entre las partes en contacto.

Al ser la turbina Francis de tipo de acción y reacción, se generan fuerzas axiales que requieren la implementación de un cojinete axial para contrarrestar esta fuerza. Este cojinete opera en conjunto con el cojinete radial durante el funcionamiento, por lo que es fundamental que su separación sea la adecuada para garantizar una lubricación eficiente y contrarrestar la fuerza axial ejercida por la turbina, Figura 42.

**Figura 42:**

*Montaje de un cojinete axial en su posición de trabajo y superficie de contacto entre el cojinete radial y axial*



*Nota: Elaboración Propia*

En este tipo de cojinetes es fundamental entender el principio de lubricación, que evita el contacto directo entre la superficie del casquillo del cojinete y el eje. Se pueden considerar dos tipos principales de lubricación:

### **1. Lubricación hidrostática:**

Ocurre cuando el lubricante es impulsado hacia el interior del cojinete mediante una bomba externa o, por elementos internos

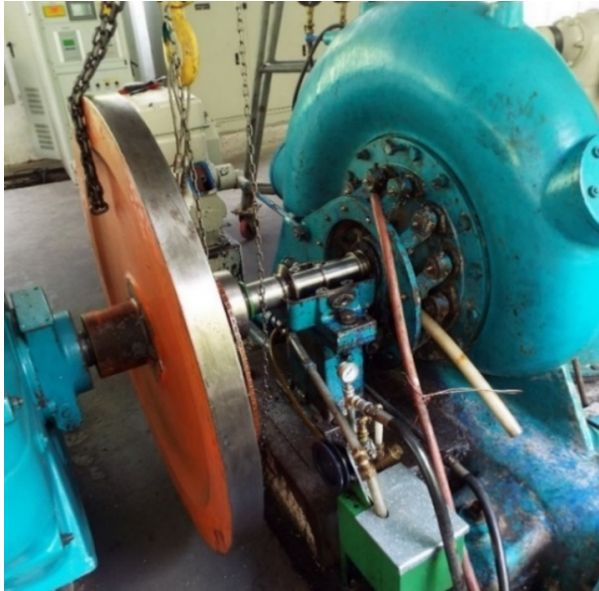
que tiene el cojinete que generan un proceso de bombeo. Este movimiento del lubricante a través de los canales de lubricación permite su distribución uniforme en el interior del conjunto.

## 2. **Lubricación hidrodinámica:**

Aquí, se forma una película fina de aceite entre el casquillo del cojinete, que evita el contacto entre ambas superficies. La presión ejercida por el eje sobre el aceite es lo que previene este contacto., por lo que resulta esencial mantener una diferencia mínima entre el diámetro del eje y el del casquillo, denominada holgura. Para garantizar esta separación, es recomendable consultar tablas específicas que indiquen la holgura máxima y mínimo permitido. Conforme aumenta la holgura, la presión generada será menor y produce calentamiento en el cojinete, que puede inclusive llegar a fundir el babbit del casquillo del cojinete. Debido al desgaste natural de los componentes internos del cojinete principal, es común que el sistema de lubricación hidrostática experimente una disminución en la presión, lo que a su vez afecta el flujo adecuado del lubricante dentro del cojinete. Esta situación provoca un incremento en la temperatura del aceite.

### **Figura 43:**

*Implementación de un sistema de bombeo y reservorio*



*Nota: Elaboración Propia*

Para mitigar este problema, se recomienda considerar una modificación en el diseño, optando por un sistema hidrostático que incorpore una bomba externa, Figura 43, para garantizar una presión y flujo más estables.

**Figura 44:**

*Cojinete principal de la turbina, cerrado y listo para funcionar.*



*Nota: Elaboración Propia*

Es de suma importancia anotar el diámetro del eje, con el cual se determina el diámetro mínimo y máximo del cojinete radial, además de medir el espesor del cojinete axial. Esta información será de gran utilidad durante el proceso de montaje, calibración y actividades de mantenimiento.

Una vez que se han realizado las mediciones de holgura radial entre el cojinete radial y el eje, así como también la holgura entre la

cara del cojinete radial y el axial, se procede a ubicar la otra mitad del cojinete y a cerrar el conjunto, dejándolo listo para las pruebas de funcionalidad, Figura 44.

# Capítulo 3

*Mantenimiento de pequeñas centrales  
hidroeléctricas*

## **3.1 Mantenimiento de pequeñas centrales hidroeléctricas**

Durante la formación en el ámbito laboral, es necesario adquirir el conocimiento conceptual de los procesos y examinar el funcionamiento de los equipos. De este modo, se inicia la planificación de lo que se debe llevar a cabo en las máquinas para mantener su funcionamiento con eficacia.

En el capítulo siguiente se analizarán algunos conceptos importantes que permitirán a un operador involucrarse en las tareas de mantenimiento y, en función de su experiencia, lograr un aprendizaje que contribuya a su formación laboral y a mantener en buenas condiciones de funcionamiento la turbina, relacionada con la parte mecánica.

Es de importancia mencionar que, como fuente de información, se ha considerado como caso de estudio una propuesta de mantenimiento para el grupo No. 2 de la pequeña central hidroeléctrica (PCH) Hidrocarolina, ubicado en el sector de San Gerónimo, Parroquia La Carolina, Cantón Ibarra, Provincia de Imbabura.

### **3.1.1 Mantenimiento**

El mantenimiento mecánico tiene diversas interpretaciones, siendo su principal objetivo el de implementar un grupo de actividades para hacer que los equipos o máquinas funcionen correctamente,

también está relacionado con la reparación de los equipos que se encuentren fuera de funcionamiento, ya sea por fallos o averías.

**Figura 45:**

*Tipos de mantenimiento aplicados en el sector de la industria.*



*Nota: Elaboración Propia*

La implementación de un programa de mantenimiento permitirá prolongar la vida útil de los equipos y maquinarias, optimizando los costos de operación y mantenimiento, en el que se considera a la

eficiencia de los equipos como una prioridad.

Hay varios tipos de mantenimiento que se aplican en las PCH, Figura 45, y que se definen a continuación:

- **Mantenimiento correctivo:** Se realiza cuando en el equipo se ha producido una falla durante su funcionamiento. Dependiendo del tipo de falla, la ausencia de operatividad del equipo puede tener un impacto negativo en la productividad, por lo que se deberá hacer una evaluación económica con el fin de minimizar su impacto.
- **Mantenimiento preventivo:** Consiste en hacer inspecciones programadas a los equipos y reemplazar ciertos elementos que, por el uso, afecten la funcionalidad de la máquina y puedan ocasionar su fallo. El mantenimiento preventivo, a diferencia del correctivo, siempre se planifica con anticipación, aunque en algunos casos, en ausencia de información, la experiencia del técnico se convierte en una guía muy valiosa. En el caso de disponer de información sobre el equipo, se siguen las instrucciones del fabricante. Otra fuente de información adicional es el historial de mantenimiento y el informe de fallas. Durante el proceso de planificación de las actividades se deben tener en cuenta los costos de mano de obra, repuestos y el tiempo de

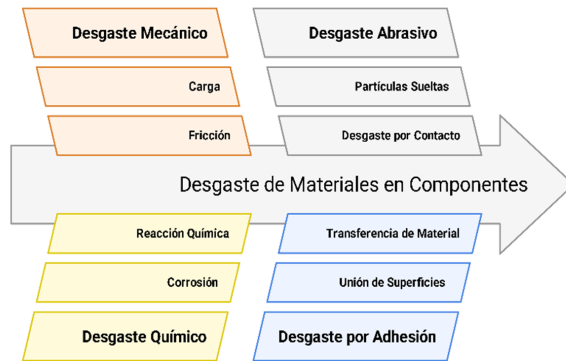
paralización de los equipos por la falta de producción, entre los principales. En la práctica, esto significa que debe contarse con los materiales y stock de repuestos con anticipación o en las fechas establecidas.

- **Mantenimiento predictivo:** Es un mantenimiento basado en la adquisición de información del equipo con el monitoreo constante de ciertos parámetros definidos durante el funcionamiento, o mediante equipos externos que permitan llevar a cabo un análisis en tiempo real de la funcionalidad del equipo y detectar posibles fallas. Las pruebas principales que se realizan son el análisis de vibraciones y la termografía.

Siendo de importancia la eficiencia en una turbina hidráulica y equipos en general, se observa que, debido a las condiciones operativas de trabajo, se genera una mayor o menor fricción entre sus componentes, causando un desgaste superficial, Figura 46. Dado esto, es fundamental elaborar un plan de mantenimiento con el objetivo de disminuir el desgaste.

**Figura 46:**

*Análisis de las causas del desgaste de materiales*



*Nota: Elaboración Propia*

superficial, Figura 46. Dado esto, es fundamental elaborar un plan de mantenimiento con el objetivo de disminuir el desgaste.

**Desgaste:** Es la pérdida de material, provocando cambios en las dimensiones, forma y acabado superficial.

El desgaste, Figura 46, no se refiere únicamente a la fricción entre materiales, por lo que es fundamental llevar a cabo un análisis en función de la teoría del desgaste denominada Tribología Cock, 2019; Kumar, 2010.

Los tipos de desgaste que pueden presentarse son mecánico, químico, abrasivo, por adhesión, erosión y fatiga. Dependiendo del tipo de desgaste, se realizan tareas de mantenimiento que pueden enfocarse en una lubricación adecuada, recubrimiento superficial y selección

de materiales.

Si una pieza presenta desgaste, debe ser reparada o reemplazada. En caso de requerir un proceso de reconstrucción o fabricación en el taller, es necesario realizar las mediciones correspondientes para obtener la información que permita definir el ajuste y la tolerancia adecuados para su correcto funcionamiento.

### 3.1.2 Ajuste y tolerancia dimensional

En las pequeñas centrales hidroeléctricas, es común que no se disponga de documentación técnica de los equipos, lo cual hace imprescindible realizar los dibujos CAD o croquis ajustados a las medidas originales de las piezas.

Cuando se decide fabricar una pieza que funciona dentro de un conjunto, en el taller se definen las tolerancias y ajustes necesarios para asegurar un acople adecuado entre las piezas, garantizando así el correcto funcionamiento del conjunto.

**Tolerancia:** Está relacionada con el proceso de manufactura de una pieza; este concepto se vincula con la calidad del trabajo, por lo que alcanzar la medida nominal,  $N$ , con alta precisión impacta directamente en los costos de fabricación, debiendo evaluarse según la funcionalidad de la pieza en la máquina.

La tolerancia puede ser de tipo dimensional y se relaciona con el control del tamaño y la forma de la pieza, mientras que la de acabado

superficial se relaciona con la calidad de la superficie.

La tolerancia dimensional es un término normalizado que requiere definir la relación de dependencia entre dos piezas que están en contacto, comúnmente denominadas eje y agujero, dependiendo de cuál sea considerado como elemento base.

Para determinar el valor de la tolerancia, se procede a la medición  $M$  de la pieza en diversas zonas y se determina el valor máximo y mínimo. La diferencia entre estos dos valores es la tolerancia, como se puede ver en la ecuación 3. Se emplea la letra minúscula  $t$  para el eje y la mayúscula  $T$  para el agujero:

$$\text{Tolerancia} = M_{\max} - M_{\min} \quad (3)$$

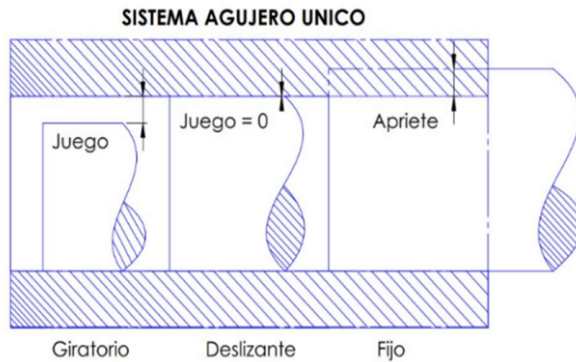
Considerando que tenemos la medida nominal del eje,  $N$ , se puede determinar la diferencia superior y la diferencia inferior con las siguientes expresiones, como se muestra en las ecuaciones 4 y 5 respectivamente:

$$\text{Diferencia superior (DS)} = M_{\max} - N \quad (4)$$

$$\text{Diferencia inferior (DI)} = M_{\min} - N \quad (5)$$

**Figura 47:**

*Posición de la diferencia de medida en un sistema agujero único (Piñeiros, 2023)*

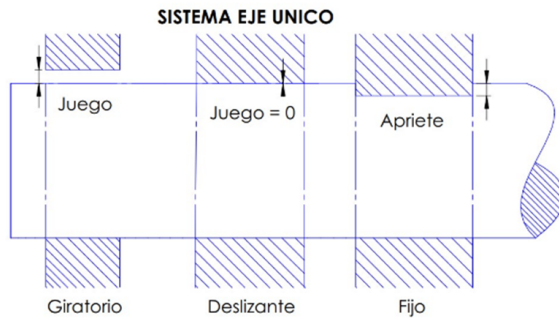


*Nota: Figura Obtenida de(Piñeiros, 2023)*

Los resultados de las diferencias calculadas pueden dar valores positivos, negativos o nulos. Para la interpretación correcta es necesario la elección del elemento de referencia, que puede ser el eje o el agujero. Si se toma como elemento de referencia el eje, se denomina *sistema de agujero único* (Figura 47); en el otro caso, se denomina *sistema de eje único* (Figura 48).

### Figura 48:

Posición de la diferencia de medida en un sistema eje único  
(Piñeiros, 2023)



Nota: Figura Obtenida de(Piñeiros, 2023)

El sistema más utilizado es el de *agujero único*, porque es más sencillo realizar cualquier trabajo de ajuste por maquinado en el eje.

Por ejemplo, si el diámetro nominal es de  $N = 80$  mm y las mediciones en el eje son  $M_{\max} = 80,07$  mm y  $M_{\min} = 80,03$  mm; las mediciones en el agujero son  $M_{\max} = 79,97$  mm y  $M_{\min} = 79,94$  mm; calcular  $DS$  y  $DI$ .

El cálculo para el eje es, como se puede ver en las ecuaciones 6 y 7:

$$DS = 80,07 - 80 = 0,07 \text{ mm} \quad (6)$$

$$DI = 80,03 - 80 = 0,03 \text{ mm} \quad (7)$$

El cálculo para el agujero es, como se muestra en las ecuaciones 8 y 9:

$$DS = 79,97 - 80 = -0,03 \text{ mm} \quad (8)$$

$$DI = 79,94 - 80 = -0,06 \text{ mm} \quad (9)$$

De manera similar, se calculan los valores de tolerancia tanto para el eje como para el agujero, como se puede observar en las ecuaciones 10 y 11:

$$t = 0,04 \text{ mm} \quad (10)$$

$$T = 0,03 \text{ mm} \quad (11)$$

La medida real de la pieza manufacturada debe estar comprendida entre esas medidas.

La relación de dependencia entre las dimensiones del eje y el agujero, considerando un sistema de *agujero único* y las dimensiones nominales de ambas piezas, permite establecer una amplia gama de medidas cuando no es posible alcanzar valores nominales. Por lo tanto, se presentan dos casos fundamentales: **juego** y **apriete**.

El *sistema de eje único* se utiliza cuando resulta más fácil modificar las medidas en el agujero.

Al analizar las figuras anteriores se afirma que, en un sistema giratorio, la funcionalidad puede variar según el nivel de ajuste entre el eje y el agujero. Cuando existe un juego apreciable, el eje ingresa al agujero sin dificultad, permitiendo un movimiento giratorio libre. En caso de poco juego, pueden aplicarse golpes ligeros para su colocación, pero aún es posible cierto movimiento giratorio. Sin embargo, cuando el juego es nulo, el movimiento relativo entre las piezas se elimina, permitiendo únicamente el deslizamiento entre las superficies en contacto.

Para el caso del *apriete*, la relación de contacto es fija, y para la inserción del eje en el agujero se requiere de una mayor fuerza, llegando incluso a utilizar una prensa hidráulica o el calentamiento de una de las piezas.

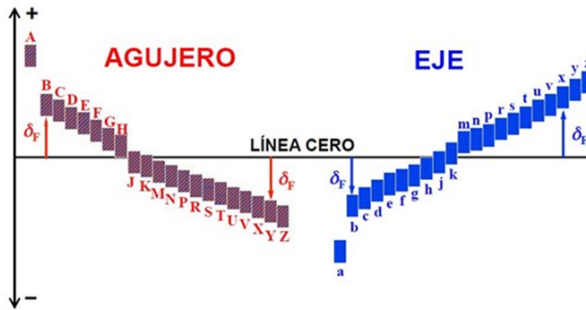
Con el fin de determinar el tipo de ajuste requerido, se aplica la norma **ISO 286-2010**, la cual indica la posición de la tolerancia y designación (Figura 49), así como su interpretación práctica en la Figura 50.

Para la representación del eje se utilizan las letras mayúsculas, y para el agujero se utilizan las letras minúsculas, cada una acompañada de un número que representa los valores máximos y mínimos

en función del tamaño de la pieza. Con estos datos se calcula el juego entre el eje y el agujero: si esta diferencia es positiva o cero se denomina **juego**, y si es negativa se denomina **apriete**.

**Figura 49:**

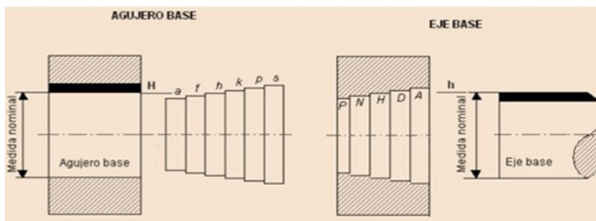
*Designación de la posición de la tolerancia según ISO 286-2010 (Ingeniería y diseño de maquinaria industrial, 2025)*



*Nota: Figura Obtenida de(Ingeniería y diseño de maquinaria industrial, 2025)*

**Figura 50:**

*Interpretación técnica para definir el tipo de ajuste en base a la tolerancia seleccionada según ISO 286-2010 (Ingeniería y diseño de maquinaria industrial, 2025)*



*Nota: Figura Obtenida de(Ingeniería y diseño de maquinaria industrial, 2025)*

### 3.1.3 Actividades de mantenimiento

#### 3.1.3.1. Comprobación del asentamiento de los puntos de apoyo de la máquina a la placa base

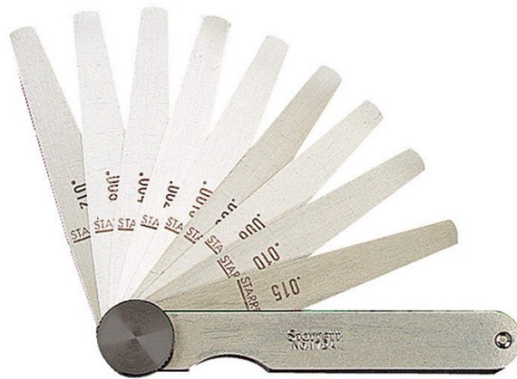
Se recomienda verificar anualmente el ajuste de los pernos de anclaje de las bases del cojinete y del generador. Este procedimiento permite identificar cualquier posible distorsión entre la placa base de asentamiento de la máquina y el punto de apoyo, fenómeno también conocido como *pata coja*.

Figura 52 muestra un *reloj comparador en centésimas de milímetro y sus partes* (Stefanelli, 2025).

Como herramientas de medición de esta distorsión se utilizan el calibrador de láminas y el reloj comparador, Figura 51 y 52.

**Figura 51:**

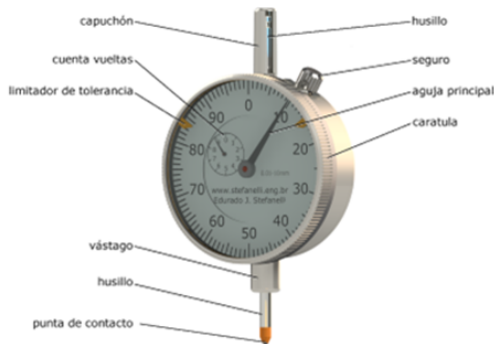
*Calibrador de láminas utilizado para medir holguras y calibración de elementos de máquinas (Grainger, 2025)*



*Nota: Figura Obtenida de(Grainger, 2025)*

**Figura 52:**

*Reloj comparador en centésimas de milímetro y sus partes (Stefanelli, 2025)*



*Nota: Figura Obtenida de(Stefanelli, 2025)*

El procedimiento de comprobación, Figura 53, consiste en aflojar un perno de sujeción del equipo a la base de asentamiento y utilizar un calibrador de láminas para verificar la existencia de holgura en el punto de apoyo del soporte de la máquina y la base de asentamiento. El valor máximo permitido debe ser inferior a 0,05 milímetros y, de la misma manera, se debe proceder a la comprobación en los otros puntos de apoyo .

**Figura 53:**

*Comprobación de la holgura mediante calibrador de láminas en uno de los apoyos*



*Nota: Elaboración Propia*

Si se dispone de un reloj comparador, Figura 54, se debe colocar la punta de contacto en el apoyo, se afloja el perno y se verifica el desplazamiento. Si el desplazamiento es inferior a 0,05 milímetros,

se considera que es aceptable; caso contrario, se debe colocar una lámina calibrada del espesor más cercano.

En caso de que el valor sea superior, se colocan láminas calibradas, Figura 55, que se adquieren en el mercado local en varias dimensiones y espesores; esto garantiza un buen contacto del apoyo de la máquina sobre la placa base.

**Figura 54:**

*Comprobación de la holgura en uno de los apoyos mediante reloj comparador*



*Nota: Elaboración Propia*

Por actividades de mantenimiento, en ocasiones es posible acceder a las diferentes placas base de soporte del equipo, lo que permite verificar la nivelación horizontal de dichas placas mediante un nivel de precisión, Figura 56. Al comprobarse que se encuentran a nivel

en longitud y a lo ancho, se garantiza que la nivelación de la placa de soporte está correcta, obteniendo un asentamiento uniforme del equipo.

**Figura 55:**

*Utilización de una lámina calibrada de 0,05 mm en uno de los apoyos del generador*



*Nota: Elaboración Propia*

**Figura 56:**

*Comprobación del nivel de la base, utilizando un nivel de precisión*



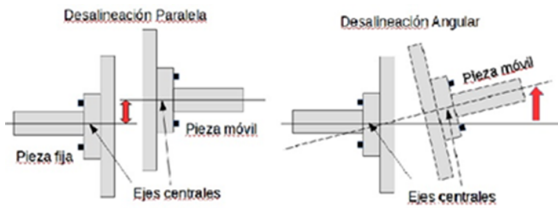
*Nota: Elaboración Propia*

### 3.1.3.2. Alineación y análisis de vibraciones

La alineación de maquinaria se refiere al proceso mediante el cual se posicionan los ejes de las máquinas rotativas de manera paralela, garantizando su correcta posición en el plano horizontal como en el vertical. Esto asegura que los equipos rotatorios están girando en torno a una misma línea de centros.

Los distintos tipos de desalineación que pueden presentarse luego de un montaje o mantenimiento se indican en la Figura 57.

**Figura 57:**  
*Tipos de desalineamiento (y Generadores, 2025)*



*Nota: Figura Obtenida de(y Generadores, 2025)*

Con la alineación se consigue que los ejes de la turbina y generador se mantengan en la misma línea de centros, para lo cual se puede utilizar el reloj comparador o con mayor precisión un equipo de alineación y nivelación con láser, Figura 58 y 59, lo que garantiza que los componentes como los cojinetes, rodamientos, sellos mecánicos, acople, entre otros, estén sometidos a un menor desgaste y esfuerzos mecánicos, aumentando así la vida útil (Jang & Khonsari, 2015).

### **Figura 58:**

*Proceso de verificación de la alineación con equipo laser de un conjunto turbina generador en la zona de acoplamiento de los dos equipos*



*Nota: Elaboración Propia*

Otra actividad importante en el mantenimiento de máquinas rotativas es la medición y evaluación de las vibraciones producidas por una máquina en funcionamiento, más conocido con el nombre técnico de análisis de vibraciones Figura 59. Las vibraciones son causadas por la presencia de desequilibrios, desalineamiento, desbalanceo, problemas de lubricación, desgaste en los cojinetes de deslizamiento, rodamientos en mal estado, cambios en las holguras mecánicas, entre los principales factores.

## Figura 59:

*Comprobación de la alineación y nivelación del conjunto turbina-generador*



*Nota: Elaboración Propia*

Para realizar un análisis de vibraciones se utilizan instrumentos especializados, Figura 60, que miden la frecuencia de vibración de una máquina. Los valores obtenidos son comparados con patrones tipo de falla, lo cual permite identificar la existencia de problemas potenciales antes de que se conviertan en fallas graves.

Por su importancia en el mantenimiento de las máquinas rotativas, la alineación y el análisis de vibraciones se recomienda realizar una vez al año y debe ser ejecutado por un especialista certificado en este campo.

**Figura 60:**

*Medición de vibraciones en el cojinete del generador lado del volante*



*Nota: Elaboración Propia*

Estos profesionales emiten un informe, Figura 61, con las conclusiones y recomendaciones de mantenimiento, preventivo como correctivo. Es fundamental comparar esta información con los datos de mediciones anteriores, porque esto facilita la toma de decisiones sobre las acciones de mantenimiento a implementar.

**Figura 61:**

*Parte de un informe de análisis de vibraciones de un grupo generado de 385 KVA, Hidroimbabura (González, 2021)*

**Valores de vibración  
EQUIPO EN OPERACIÓN CON CARGA**

PUNTO	FECHA	ACELERACIÓN[ <i>g</i> ]	VELOCIDAD[mm/s]	ENVOLVENTE[ <i>g</i> ]	DESPLAZAMIENTO[ <i>µm</i> ]
1 - Vertical 1 V	26/12/2019 13:46	0,405	4,25	1,043	97,5
1 - Horizontal 1 H	26/12/2019 13:47	0,562	5,07	2,556	115,2
1 - Axial 1 A	26/12/2019 13:47	0,577	1,83	2,045	35,6
1 - vertical 2 V	26/12/2019 13:48	2,204	2,59	10,78	50,9
2 - Horizontal 2 H	26/12/2019 13:48	3,074	4,7	9,168	110,6
2 - Axial 2 A	26/12/2019 13:49	1,318	2,28	4,153	38,7
3 - Vertical 3 V	26/12/2019 13:50	0,197	2,71	0,744	69,8
3 - Horizontal 3 H	26/12/2019 13:50	0,233	1,8	0,811	42,2
3 - Axial 3 A	26/12/2019 13:51	0,622	1,38	1,814	34,3
4 - Vertical 4 V	26/12/2019 13:51	0,322	2,19	1,102	58,7
4 - Horizontal 4 H	26/12/2019 13:52	0,656	1,91	1,72	40,6
4 - Axial 4 A	26/12/2019 13:52	0,381	2,06	1,083	53,9

**ESPECTROS DEL CONJUNTO**

*Como se puede observar en las tablas de valores del conjunto, los valores de vibración del conjunto se encuentran en zona de tolerancia, pero con un comportamiento inusual en el punto #2. CHUMACERA LADO GENERADOR Y VOLANTE, la misma que presenta un comportamiento elevado en envolvente y aceleración en la dirección axial.*

*Los valores y espectros adjuntos nos indicarán el estado vibracional del punto inspeccionado tomando en cuenta amplitud y fase.*

*Nota: Figura Obtenida de(González, 2021)*

### 3.1.3.3. Mantenimiento del rodete, álabes del distribuidor y otros componentes del caracol

El agua que ingresa a una turbina, en la mayoría de los casos, siempre tendrá sólidos en suspensión, que, a pesar de ser pequeños, es el principal agente que causa el desgaste en los elementos internos de la turbina que están en contacto con el fluido, Figura 62. A pesar de utilizar materiales de alta dureza, el continuo impacto del material particulado provoca desgaste por abrasión.

## Figura 62:

*Desgaste interno de una turbina Francis horizontal de 250 KW*

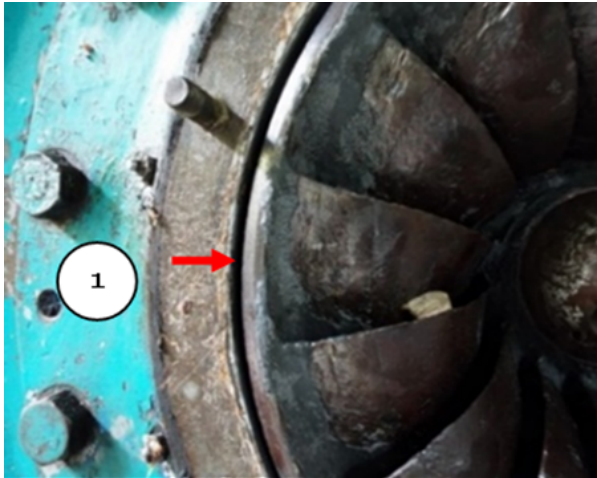


*Nota: Se muestra el desgaste en varios elementos internos de la turbina, los cuales son reconstruidos utilizando material polímero de relleno de alta dureza. Una vez seco, este material es rectificando y, como recubrimiento final liso, se utiliza el material polímero denominado cerámico; Elaboración Propia.*

En esta zona, se recomienda medir la holgura inicial entre la corona del rodete y el anillo frontal de la turbina, la cual suele ser de 0,25 mm en la mayoría de los equipos similares, como se muestra en la figura 63. En función de las horas de funcionamiento, es común que dicha holgura aumente por el desgaste de tipo abrasivo que se produce, lo que provoca una disminución de la eficiencia de la turbina y genera un mayor empuje axial en el cojinete principal.

### Figura 63:

*Holgura entre corona del rodete y anillo frontal de la turbina, valor de 0,20 mm recomendable*



*Nota: (1) El valor de esta holgura debe registrarse y de llegar a valores superiores a 0,5 mm requiere de una acción correctiva, se implementa acciones de protección para controlar el desgaste en esta zona; Elaboración Propia.*

En caso de tener que realizar la alineación del eje debido a un mantenimiento mayor, se recomienda rectificar el anillo frontal y la corona, de tal manera que se tenga puntos concéntricos iguales, garantizando así una alineación horizontal y vertical que ayuda a posicionar el cojinete de la turbina con mayor facilidad.

## Figura 64:

*Desgaste en un rodete turbina Francis horizontal*



*Nota: Elaboración Propia*

El rodete es uno de los elementos más afectados por el desgaste abrasivo, Figura 64. Para su reconstrucción, se emplean materiales polímeros debido a su facilidad de aplicación y rapidez en la reparación, Figura 65. También puede utilizarse un proceso de soldadura con recubrimiento de carburos; sin embargo, debido al aporte de material que implica, es necesario realizar un balanceo estático y dinámico del conjunto con el eje para evitar vibraciones por desbalanceo (Toapanta, 2019).

### **Figura 65:**

*Proceso de reconstrucción de un rodete con material polímero de relleno y capa final con polímero tipo cerámico*



*Nota: Elaboración Propia*

El uso de material polímero para la reconstrucción de un rodete, Figura 65, tiene la ventaja de que es un aporte de material uniforme en la superficie, lo que no ocasiona un desbalance del conjunto. Por seguridad, se recomienda realizar un balanceo estático. Además, si se realiza un análisis de vibraciones al equipo, en el reporte no se generan frecuencias distorsionantes por desbalanceo.

**Figura 66:**

*Reconstrucción de los álabes de un rodete con soldadura y proceso de balanceo dinámico*



*Nota: Elaboración Propia*

Para el caso en que se utiliza el proceso de reconstrucción con soldadura, Figura 66, el aporte de material es significativo; eso implica realizar un balanceo dinámico del conjunto.

### **Figura 67:**

*Reconstrucción del anillo, álabes y otros elementos internos con material polímero de relleno y recubrimiento final durante un proceso de mantenimiento anual*



*Nota: Elaboración Propia*

Concluida la reconstrucción de las piezas, Figura 67, se procede al montaje, Figura 68. Es importante tener precaución durante el montaje de las piezas reconstruidas, ya que pueden presentarse zonas de rozamiento debido a sobremedidas generadas por el exceso de material polímero aplicado en las piezas. En estos casos, es necesario realizar un rectificado del área afectada.

## Figura 68:

*Proceso de montaje del rodete en el eje de la turbina utilizando las herramientas específicas para el equipo*



*Nota: Elaboración Propia*

En esta fase del mantenimiento se recomienda realizar las siguientes actividades de manera complementarias:

1. **Inspección visual por corrosión:** Observar el agujero del rodete y eje que no existan puntos de oxidación. La existencia de óxido indica un desgaste, que podría deberse a un montaje

inadecuado o por el uso de lijas demasiado abrasivas durante la limpieza.

2. **Control de medidas:** Realizar mediciones de precisión del diámetro del eje y del agujero para confirmar que el ajuste se encuentra dentro de los parámetros establecidos. Para ello, se emplean herramientas de medición como el compás de interiores, exteriores y el calibrador pie de rey. En caso de disponer de un micrómetro para la medición de interiores y exteriores, se obtendrá medidas con mayor precisión.
3. **Protección contra la oxidación:** Aplicar algún tipo de pasta o líquido antiadherente durante el montaje para evitar, con el paso del tiempo, trabamientos entre el eje y agujero del rodete.
4. **Verificación de posición:** Medir la distancia entre el eje y el extremo del agujero visible del rodete para asegurar si está en la posición tope. El registro de esta distancia es un dato como referencia.

También es importante antes de un mantenimiento, inspeccionar posibles fugas de agua en los sellos del eje de los álabes del distribuidor, Figura 69. Estas fugas pueden originarse por el deterioro del sello del álabe o por un desgaste en los bujes en los que se soporta el álabe.

## Figura 69:

*Cambio de sellos de los álabes directrices y engrase, para prevenir fugas de aguas*



*Nota: Se ilustra el procedimiento para el cambio de los sellos, esto implica realiza el desmontar el mecanismo de apertura y cierre de los álabes. Esto permite reemplazar los sellos y la lubricación con grasa al mecanismo. Este procedimiento corrige o previene las fugas de agua; Elaboración Propia.*

Cuando se detecta un juego apreciable en los álabes, se procede a revisar los bujes de apoyo, lo cual implica desmontar los anillos frontal y posterior de la turbina. En el taller se extraen los bujes mediante el uso de una prensa, Figura 70, se verifican medidas y se fabrican nuevos bujes ajustados a la medida del eje rectificado, asegurando así un ajuste de poco juego.

## Figura 70:

*Proceso de preparación previo al cambio de los bujes en las tapas frontal y posterior, en el taller mecánico*



*Nota: Elaboración Propia*

El desgaste en los bujes genera dos efectos en la turbina:

1. Ruido interno en la turbina: Genera un ruido característico al interior de la turbina, conocido como golpeteo del álabe.
2. Fugas de agua en los sellos: La mayor holgura permite que la presión del agua al interior de la turbina genera fugas a través de los sellos, que son diseñados para baja presión.

### 3.1.4 Mantenimiento de cojinetes

Dado que es un elemento soporte del eje de la turbina y punto de referencia para el correcto funcionamiento de una turbina, es neces-

rio evaluar sus medidas en comparación con otros elementos fijos del conjunto. Si se dispone de planos CAD del conjunto, se procederá a verificar las medidas; en caso contrario, elaborar un boceto con las dimensiones correspondientes.

Como ejemplo, se ha tomado en consideración el cojinete principal de una turbina Francis y se realizan algunas mediciones utilizando el calibrador de láminas y calibrador pie de rey. Los valores obtenidos se registran para ir evaluando el desgaste, proceso que se observa en las Figuras 71 a 74.

**Figura 71:**

*Medición de la holgura axial con calibrador de láminas, debe ser uniforme en su contorno*



*Nota: Elaboración Propia*

**Figura 72:**

*Medición del espesor del cojinete para definir la holgura axial*



*Nota: Elaboración Propia*

**Figura 73:**

*Medición de la distancia entre la parte frontal del cojinete radial y disco del eje*



*Nota: Elaboración Propia*

**Figura 74:**

*Medición de holguras axial entre el anillo del eje y cara axial del cojinete radial, zona media del cojinete*



*Nota: Elaboración Propia*

Las mediciones de holguras radial y axial del cojinete deben realizarse de manera periódica, para monitorear y analizar la evolución del desgaste.

Para estas mediciones se utilizan instrumentos de precisión, que permiten medir tanto el diámetro del eje como el diámetro interior del cojinete. La holgura radial se calcula restando estos valores, y el valor obtenido debe estar dentro del rango especificado en la Tabla 4.

Si la holgura se acerca al límite máximo, es necesario planificar el cambio del cojinete, ya que esto afecta a la lubricación interna del

cojinete.

**Tabla 4:**

*Suggested running clearances (Holguras de funcionamiento sugeridas) (H. & Hirani, 2000)*

Shaft diameter (mm)	Minimum clearance (mm)	Maximum clearance (mm)
> 50	0.03	0.05
50-70	0.04	0.06
70-90	0.05	0.08
90-100	0.06	0.09

*Nota: Elaboración a partir de (H. & Hirani, 2000)*

Cuando aparecen zonas brillantes en el babbit del cojinete, esto significa que es una zona de mayor rozamiento, se recomienda realizar un rectificado manual utilizando lija número 1000. Este proceso debe realizarse con mucho cuidado debido a las pequeñas holguras, evitando así un desgaste excesivo de la superficie.

Tras finalizar la toma de medidas y rectificado manual, es fundamental llevar a cabo la limpieza de los cojinetes y del alojamiento. Finalmente, se realiza el montaje, Figura 75, siguiendo los procedimientos detallados anteriormente.

Para controlar las temperaturas en los cojinetes o rodamientos, es recomendable elaborar una hoja de registro de temperaturas con mediciones cada hora. La medición de la temperatura se puede realizar con un termómetro infrarrojo o mediante un sistema de sensores

de temperatura que pueden ser inclusive integrados a un sistema de mantenimiento.

Este registro permite monitorear y analizar el desgaste del cojinete y adoptar medidas preventivas de mantenimiento. En el caso específico de los cojinetes de deslizamiento, la temperatura no debe exceder los 54 °C, por precaución.

**Figura 75:**

*Proceso de mantenimiento de un cojinete axial y radial*



*Nota: Elaboración Propia*

Además, la inspección de las temperaturas en el cojinete axial proporciona información complementaria. Un incremento en esta temperatura puede indicar un posible aumento de la presión axial, lo cual podría estar relacionado con un incremento en las holguras del cojinete, desgaste en los componentes internos de la turbina o algún problema en el tope axial del generador. El valor recomendado para la holgura axial está entre 0,10 mm y 0,20 mm.

Cada año es conveniente llevar a cabo una verificación de la alineación del conjunto turbina y generador, así como realizar un análisis de vibraciones y termografía. La termografía permite identificar la distribución de temperaturas al interior de los elementos rodantes.

El informe resultante es fundamental para coordinar acciones de mantenimiento preventivo y correctivo, de acuerdo con las recomendaciones del técnico especialista.

El cambio de aceite es otro factor de importancia en el mantenimiento de los cojinetes. Dado que un grupo generador funciona las 24 horas del día cuando se dispone de agua, el cambio de aceite se efectúa cada año o según el número de horas promedio de operación indicado por el técnico de mantenimiento. En el caso de los rodamientos, es necesario aplicar grasa con mayor frecuencia; debe hacerse al menos cada 15 días.

Realizar un mantenimiento adecuado permite controlar el des-

gaste en el cojinete; sin embargo, si debido a condiciones externas la turbina permanece a una velocidad de giro superior a la velocidad de embalamiento durante un tiempo prolongado, los parámetros dimensionales del cojinete pueden verse comprometidos. Esta velocidad se alcanza cuando, en pleno funcionamiento, la carga se quita de forma inesperada, generando una sobrevelocidad que el regulador de velocidad debe controlar de inmediato cerrando los álabes. Si el regulador no actúa, el cojinete radial y axial puede sufrir daños significativos, llegando incluso a quedar inservibles.

Según lo expuesto, se recomienda al operador de turno realizar las siguientes actividades de control:

- **Verificar el sistema de lubricación del cojinete:** Asegurarse de que el sistema funcione correctamente y revisar que el aceite en el reservorio no esté contaminado con agua, ya que la presencia de agua puede indicar una falla en el sello mecánico entre la turbina y el eje.
- **Controlar el nivel de aceite:** Un descenso en el nivel de aceite puede indicar una fuga, mientras que un aumento es señal de un ingreso de agua al cojinete.
- **Realizar inspecciones visuales y táctiles:** Estas permiten identificar vibraciones anormales o temperaturas elevadas du-

rante el funcionamiento.

- **Medir y registrar la temperatura de los cojinetes y rodamientos:** Un incremento en la temperatura indica problemas potenciales y permite tomar acciones correctivas de forma temprana.
- Mantener la limpieza del equipo
- Aplicar engrase frecuente a elementos rodantes
- Verificar el funcionamiento del regulador de velocidad ante una desconexión de la carga.
- Comunicar cualquier anomalía en el funcionamiento.

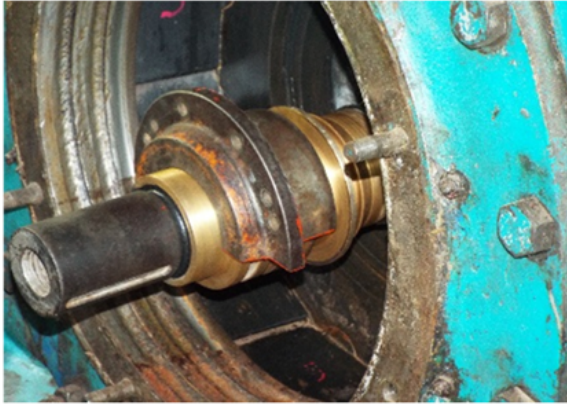
Adoptar estas recomendaciones permite a los operadores y técnicos de mantenimiento organizar un plan de mantenimiento preventivo y programado, lo cual contribuye a prolongar la vida útil de los cojinetes de deslizamiento y rodamientos.

### **3.1.5 Laberinto**

Es un tipo de sello mecánico que cierra el espacio entre el interior de la turbina y el eje, y se lubrica con el agua de la turbina a baja presión y de manera controlada. En el grupo No.2 de la central hidroeléctrica Hidrocarolina, el tipo de sello empleado se muestra en la Figura 76 y es del tipo laberinto.

## **Figura 76:**

### *Sello mecánico tipo laberinto*



*Nota: Elaboración Propia*

Este sello no requiere mantenimiento; sin embargo, si comienza a salir agua en exceso, existe el riesgo de que ingrese al cojinete, lo cual indica la necesidad de reemplazar el sello por otro nuevo.

Este tipo de sellos se fabrica con materiales como el bronce-aluminio o bronce fosfórico, y su tapa de cierre es de acero. Es fundamental prestar atención al tipo de ajuste que se le vaya a dar con el eje. Un ajuste excesivo ocasiona dificultades al momento de realizar su cambio, ya que se utiliza la tapa de cierre para su extracción.

Durante el montaje del laberinto, se debe considerar la holgura axial en el cojinete principal. Una de las formas de verificar si el laberinto está bien posicionado es en funcionamiento y con carga. No debe generar ningún tipo de limalla en el agua de desfogue del

laberinto; en caso de surgir este inconveniente, se debe analizar la holgura en el cojinete axial. Los sellos mecánicos no están diseñados para soportar cargas axiales.

Otra opción de sello mecánico para el cierre entre la tapa de la turbina y el eje es la utilización de prensaestopas del tipo cordón grafitado, Figura 33. Este sistema permite un mayor control sobre la salida de agua y se ajusta conforme se observa un aumento en el desfogue de agua. Después de cierto tiempo, se reemplaza por un nuevo grupo de cordones por su excesiva compresión.

**Figura32:**

*Proceso de montaje de un sello mecánico con prensaestopas y tubería de desfogue del agua a baja presión*



### 3.1.6 Regulador de velocidad

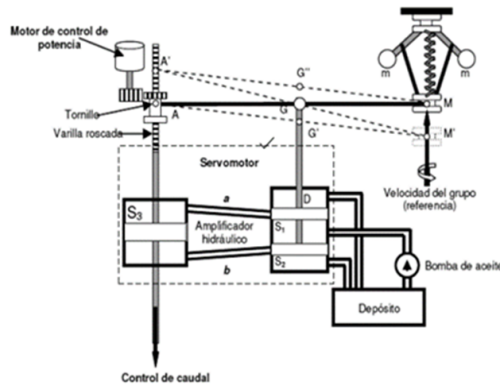
En las turbinas Francis antiguas, los reguladores de velocidad son de tipo mecánico–hidráulico. Este sistema actúa directamente sobre el mecanismo del distribuidor de la turbina, permitiendo el control de la apertura o cierre de los álabes. Su función principal es mantener la velocidad constante en la turbina y la estabilidad. Además, cuando la turbina está en sincronismo con la red eléctrica de interconexión, con el regulador se controla la potencia del grupo generador, ajustando el caudal de agua que ingresa al rodete.

El funcionamiento de los reguladores de velocidad se basa en el principio de la fuerza centrífuga generada cuando un componente denominado péndulo se abre o cierra en función de la velocidad de giro y la presión de aceite que genera una bomba de engranes, que acciona un sistema mecánico de varillas y émbolos que producen el movimiento de los álabes del distribuidor.

En la Figura 33 se observa el principio de funcionamiento de un regulador de velocidad clásico en estos grupos de generación antiguos, y en la Figura 34 se da a conocer cómo este principio se aplica en una turbina hidráulica. Para el sistema hidráulico se dispone de una bomba que gira a la misma velocidad de la turbina, generando la presión requerida para el sistema de servomotor interno del regulador.

### Figura 33:

Diagrama funcional de un regulador centrífugo de esferas girantes (Pacheco, 2019)



Nota: Figura Obtenida de(Pacheco, 2019)

En la Figura 35 se indica un regulador de velocidad y algunas partes internas.

Por su importancia en el control de la turbina, para el mantenimiento es importante comprender la funcionalidad que permitirá tomar acciones de mantenimiento y pruebas de funcionalidad, en especial cuando existe un rechazo de carga por causas mecánicas o eléctricas (OLADE & ONUDI (Organización Latinoamericana de Energía y Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial), 1985; Organización Latinoamericana de Energía, 1981; Viteri, 1988).

## Figura 34:

*Diagrama funcional de un regulador centrífugo de esferas girantes (Pacheco, 2019)*



### **Péndulo Centrifugo**

Se mueve debido a la fuerza centrífuga al cambiar la velocidad de giro de la turbina en función de la apertura de la válvula de agua principal



### **Varillas de Control**

Las varillas transmiten el movimiento del péndulo a la válvula de control



### **Válvula de Control Hidráulico**

Regula el flujo de aceite hacia el servomotor



### **Servomotor Hidráulico**

Convierte la presión del aceite en movimiento mecánico para movimiento de los álabes distribuidor



### **Álabes del Distribuidor**

Los álabes controlan la entrada de agua al rodete de la turbina



### **Rodete de la Turbina**

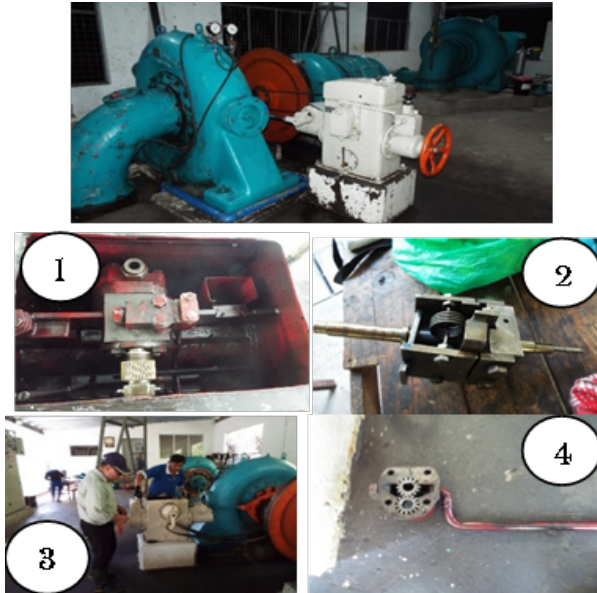
El rodete convierte la energía del agua en energía mecánica

*Nota: Figura Obtenida de(Pacheco, 2019)*

Los avances tecnológicos en la automatización han permitido el desarrollo de reguladores electrónicos–hidráulicos con control automático, Figura 36, basados en los principios de funcionamiento de los reguladores de velocidad mecánico–hidráulicos. Estos sistemas están conformados por una unidad hidráulica, un conjunto de electroválvulas, y diversos sensores de presión, frecuencia y posición, entre otros.

### Figura 35:

*Regulador de velocidad mecánico-hidráulico del grupo G2 de la central hidroeléctrica Hidrocarolina*



*Nota: Muestra algunos elementos fundamentales de un regulador de velocidad, tales como la bomba de engranes (1), válvulas de control de flujo (2), regulador centrífugo tipo péndulo (3), mecanismos de accionamiento del sistema (4), bomba de engranes del sistema; Elaboración Propia.*

### Figura 36:

*Regulador de velocidad de tipo electrohidráulico y control automático*



*Nota: Elaboración Propia*

El funcionamiento del sistema está controlado por un controlador lógico programable (PLC), el cual procesa la información de los sensores y emite las señales necesarias para el accionamiento de un cilindro hidráulico. Este cilindro es el encargado de regular la apertura y cierre de los álabes del distribuidor, optimizando así el control del caudal de agua que ingresa al rodete de la turbina (Figura 36). La

implementación de estos reguladores automáticos mejora la eficiencia operativa, reduce la necesidad de intervención manual y permite una respuesta más rápida y precisa a las variaciones en las condiciones de operación de un grupo de generación hidráulico (Alania, 2017; Caicedo & Murcia Polo, 2011; Quintero & Cardoza, 2012).

Una funcionalidad complementaria de los reguladores de velocidad en operación es su capacidad para actuar inmediatamente ante un rechazo de carga. Este fenómeno puede ocurrir debido a condiciones propias de la máquina o por una desconexión causada por la pérdida de señal del sistema eléctrico de referencia (Alania, 2017).

El regulador debe estar calibrado de manera que, al superar una frecuencia predefinida, cierre inmediatamente los álabes para evitar que la máquina alcance la velocidad de embalamiento. Esta función se realiza mediante una válvula de seguridad que alivia la presión del sistema, provocando así el cierre.

Como acciones de mantenimiento para los reguladores de velocidad mecánico–hidráulico, se recomienda llevar a cabo las siguientes actividades:

1. Revisar los manómetros de presión de aceite para asegurar que se encuentran dentro de los rangos operativos establecidos.
2. Verificar que el nivel de aceite sea el adecuado y llevar a cabo su

cambio en función del número de horas de funcionamiento, que como referencia se hace una equivalencia al número de horas de funcionamiento continuo al año.

3. Aplicar engrase cada quince días a los elementos móviles del regulador y del distribuidor.
4. Limpiar semanalmente el filtro interno de aceite para prevenir pérdidas de presión y flujo en el sistema.
5. Efectuar pruebas de accionamiento por parada emergente para garantizar el correcto funcionamiento del sistema.
6. Comprobar que los ejes internos que accionan las válvulas no estén deformados y se deslicen sin inconvenientes.
7. Limpiar las tuberías de conexión internas.
8. Limpieza del depósito de aceite.

### **3.1.7 Mantenimiento del generador, excitatriz y tableros de control**

Este libro no abordará en profundidad el mantenimiento del generador, excitatriz y tableros de control debido a la especificidad del tema y relación con las normas eléctricas. Sin embargo, a continuación, se brindan algunas recomendaciones generales para cada componente.

## Generador:

- **Control de las temperaturas:** Monitorear las temperaturas de los cojinetes o rodamientos. Para el caso de cojinetes de deslizamiento, medir la holgura existente.
- **Análisis del posicionamiento:** Realizar un análisis del posicionamiento del rotor con respecto a la carcasa, definiendo el centro mecánico del rotor.
- **Mantenimiento anual:** Realizar medición de vibraciones, análisis con termografía y alineación entre la turbina y el generador.
- **Limpieza interna:** Llevar a cabo una limpieza de los devanados del estator y rotor, aplicar un barnizado superficial y medir la resistencia de aislamiento de los bobinados.
- **Limpieza general y ajustes:** Limpiar y ajustar las conexiones para asegurar un correcto contacto y evitar puntos calientes.
- **Rectificado de los anillos de alimentación de corriente:** Si los anillos presentan irregularidades en su superficie, rectificar y limpiar los anillos, así como revisar los carbonos.

**Excitatriz:** En los equipos antiguos, la excitatriz utiliza anillos rozantes para generar la corriente necesaria para el campo magnético en el rotor del generador. Los equipos modernos, en cambio, emplean un puente rectificador con diodos en lugar de anillos rozantes.

- **Limpieza y ajuste:** Realizar una limpieza general y ajuste de los terminales y elementos internos.
- **Revisión de rodamientos:** Verificar que los rodamientos estén bien lubricados y en buenas condiciones.
- **Medición de aislamiento:** Medir la resistencia de aislamiento de las bobinas.
- **Inspección de carbones y porta carbones:** Comprobar el estado de los carbones y porta carbones.
- **Rectificado del colector:** Si el colector presenta irregularidades en su superficie, rectificar y limpiar las delgas, así como profundización si es necesario.
- **Verificación de diodos:** Para excitatrices con puente de diodos, verificar sus propiedades eléctricas.

#### **Tablero de control:**

- **Limpieza interna:** Retirar polvo o cualquier suciedad.

- **Revisión de equipos de medición:** Verificar voltímetros, amperímetros, cofímetros y medidores multifunción.
- **Inspección de calentamiento:** Comprobar si algún elemento presenta un calentamiento excesivo.
- **Pruebas del disyuntor principal:** Verificar el correcto funcionamiento del disyuntor del equipo.
- **Inspección de focos de señalización:** Cambiar inmediatamente aquellos que no funcionen.
- **Verificación de sistemas de protección:** Asegurar que todos los sistemas de protección estén funcionando adecuadamente.
- **Revisión de planos eléctricos:** Revisar los planos eléctricos existentes o realizarlos en caso de no disponer de ellos.

### 3.1.8 Plantillas para planificación del mantenimiento

En esta sección se presentan formatos de referencia que pueden aplicarse para el registro de las condiciones de operación de los equipos, la planificación del mantenimiento y la elaboración del presupuesto. En la Tabla 5 se puede ver el formato para el registro diario de parámetros operativos como potencia generada, temperaturas de equipos y consumo energético. Para la programación de actividades

de mantenimiento preventivo, en la Tabla 6 se presenta un cronograma mensual detallado. Los datos técnicos específicos de la central hidroeléctrica pueden consignarse en la Tabla 7, mientras que en la Tabla 8 se detalla el presupuesto de materiales para mantenimiento. El consumo de combustibles y lubricantes se registra en la Tabla 11, y los costos de servicios básicos y asesoría técnica en las Tablas 12 y 13 respectivamente. Estos documentos resultan esenciales para la gestión eficiente y la operatividad de una pequeña central hidroeléctrica, permitiendo un control adecuado de los procesos y una optimización de los recursos disponibles (H. & Hirani, 2000; Organización Latinoamericana de Energía, 1981; Pacheco, 2019).

### 3.1.8.1. Plantilla de control diaria de generación

**Tabla 5:**

*Datos Generacion de central hidroeléctrica*

DATOS GENERACIÓN CENTRAL HIDROELÉCTRICA									
HIDROCAROLINA									
Fecha:									
Operador:									
Hora	Potencia	Factos de Potencia	Exitación		TEMPERATURAS °C (Turbina          Generador)				Lectura de energia
	KW	cos( $\theta$ )	V	A	Lado Turbina	Lado volante	Lado generador	Lado Excitatriz	KW-H
01:00									
02:00									
03:00									
04:00									
05:00									
06:00									
07:00									
08:00									
09:00									
10:00									
11:00									
12:00									
13:00									
14:00									
15:00									
16:00									
17:00									
18:00									
19:00									
20:00									
21:00									
22:00									
23:00									
24:00									
Observaciones:									

*Nota: Elaboración Propia*



### 3.1.8.3. Datos técnicos de centrales hidroeléctricas

**Tabla 7:**

*Datos técnicos de Central Hidroelectrica*

<b>CENTRAL HIDROELÉCTRICA</b>	
<b>Empresa:</b>	
<b>Nombre central:</b>	
<b>A. DATOS TÉCNICOS</b>	
<b>TURBINA</b>	<b>G. N°: 1    G. N°: 2</b>
Marca:	
Tipo:	
Año de fabricación:	
N° de fábrica:	
Caída:	
Caudal:	
Potencia:	
Velocidad Nominal:	
Velocidad de embalamiento:	

<b>REGULADOR DE VELOCIDAD</b>	
Marca:	
Tipo:	
Potencia:	
Año de fabricación:	
Nº de fábrica:	
<b>GENERADOR</b>	
Marca:	
Nº de fábrica:	
Tipo:	
Potencia:	
Voltaje:	
Intensidad:	
Factor de potencia:	
Ve:	
Ie:	
Velocidad:	
Frecuencia:	
Nº de fases:	
Año:	

<b>EXCITATRIZ</b>	
Marca:	
N°:	
Tipo:	
Potencia:	
Voltaje:	
Intensidad:	
Velocidad:	
Año:	
<b>B. DATOS GENERALES DE LAS CENTRALES</b>	
Provincia:	
Cantón:	
Parroquia:	
Año que entró en servicio:	
Río que sirve a la central:	
Longitud de la tubería de presión:	
Diámetro de la tubería de presión:	
Superficie de la casa de máquinas:	
Subestación de entrega:	
Largo de la línea de transmisión eléctrica:	
Calibre de la línea de transmisión:	
Tensión:	

*Nota: Elaboración Propia*

### 3.1.8.4. Presupuesto de gastos de operación y mantenimiento

**Tabla 8:**  
*Presupuesto de gastos*

01 PRESUPUESTO DE GASTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO				
Empresa:		Nombre central hidroeléctrica:		Fecha de elaboración:
MATERIALES				
Mantenimiento				
Material	Unidad	Cantidad	Valor unitario	V/TOTAL
Materiales varios de ferretería				
Electrodos				
Brocas varias medidas				
Discos abrasivos				
Hojas de sierra				
Hojas de lija				
Silicona				
Wype				
Otros materiales (indicar)				
Pinturas y recubrimientos para mantenimiento				
Pinturas sintéticas				
Pinturas epóxicas				
Thiñer				
Pintura de tráfico				
Anticorrosivo para tubería de presión				
Otros materiales (indicar)				
Materiales especiales para mantenimiento				
Grasa antiadherente				
Polímeros				
Aceite penetrante				
Spray limpiador de contactos				
Solvente eléctrico				
Otros materiales (indicar)				
Empaquetaduras				
Cordón de empaque grafito varias medidas				
Plancha de neopreno varias medidas				
Plancha de empaquetadura				
Otros materiales (indicar)				

*Nota: Elaboración Propia*

**Tabla 9:**  
*Enseres Menores*

02 SUMINISTRO, ENSERES MENORES				
Nº	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD ESTIMADA al AÑO	V/UNITARIO	V/TOTAL
<b>Supervisión</b>				
1	Carpetas folder de cartulina			
2	Hojas de registro de centrales			
3	Cinta adhesiva embalaje			
4	Cuadernos			
5	Esferos			
6	Marcadores			
7	Papel bond A4			
8	Papel higiénico rollo grande			
9	Papel toalla para secar manos			
10	Sobres de manila tamaño F4			
11	Fundas de basura			
12	Otros materiales (indicar)			
13				
<b>Operación</b>				
1	Líquido desengrasante			
2	Escobas cepillos			
3	Detergente			
4	Desinfectantes			
5	Gasolina			
6	Otros materiales (indicar)			
7				
8				

*Nota: Elaboración Propia*

**Tabla 10:***Repuestos, accesorios y equipo eléctrico*

<b>03 REPUESTOS, ACCESORIOS Y EQUIPO ELÉCTRICO</b>		
<b>Mantenimiento</b>		
<b>Repuestos, accesorios</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor (USD)</b>
Grupo No. XXX		
Cojinetes turbina		
Cojinetes generadores		
Relés de protección		
Disyuntor principal		
Tarjeta AVR		
Rodamientos Nxxxxx		

*Nota: Elaboración Propia***Tabla 11:***Combustible y Lubricantes*

<b>04 COMBUSTIBLES, LUBRICANTES, GENERACIÓN</b>		
<b>Operación</b>		
<b>Material</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor (USD)</b>
Aceite ISO 46		
Aceite ISO 68		
Aceite dieléctrico		
Grasa		

*Nota: Elaboración Propia*

**Tabla 12:***Presupuesto de servicios básicos de la central hidroeléctrica*

<b>05 SERVICIO LUZ, AGUA, TELÉFONO</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Valor (USD)</b>
Teléfono fijo	
Teléfono móvil	
Agua	
Luz	
Sistema de comunicación medidores	
Otros	

*Nota: Elaboración Propia***Tabla 13:***Presupuesto de contratos de asesoría técnica de la central hidroeléctrica*

<b>06 CONTRATOS ASESORÍA TÉCNICA</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Valor (USD)</b>
Medición de vibraciones, termografía y alineación	
Mediciones parámetros eléctricos generadores	
Reparaciones obras civiles captación y tanque de carga	
Otros ensayos	

*Nota: Elaboración Propia*

# Bibliografía

- Alania, M. (2017). *Regulación por sistema electrohidráulico para obtener velocidad constante de la turbina Pelton de la FIM-UNCP* [Tesis para obtener el título de ingeniero mecánico]. Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.
- Arechua de la Cruz, G. B. (2018). *Diseño hidráulico de la tubería de presión de la mini central hidráulica Huaura, distrito de Pachico, provincia de Huaura, Lima* (Informe Técnico).
- Caceres, L. E. A. (2008). *Aplicaciones de sellos mecánicos en bombas de la industria petrolera ecuatoriana* [Proyecto de titulación, Ingeniero Mecánico]. Escuela Politécnica Nacional.
- Caicedo, G., & Murcia Polo, F. (2011). *Obtención de parámetros de los reguladores de velocidad* [Accessed: Aug. 13, 2025]. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/entities/publication/d4d7f8f3-a738-41c7-8d15-0ad2f167b963>
- Castillo, G. (2010). *Diseño y selección de nueva tubería de presión para la central hidroeléctrica Río Blanco de la empresa eléctrica Riobamba S.A.* (Trabajo de Graduación). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Cock, V. M. (2019). Hidroabrasi3n en turbinas Francis: caso de estudio en cinco aprovechamientos hidroeléctricos instalados en la zona del Batolito antioqueño [Trabajo académico].
- de Souza Barros, G. P., Martinez, C. B., de F. Viana, E. M., Diniz, H. A. G., & Duarte, W. M. (2019). Labyrinth Seals - A Literature Review. *Proceedings of the 25th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM)*. <https://doi.org/>

10.26678/abcm.encit2018.cit18-0775

- Farinango, V., & Rigoberto, J. (2013). *Dimensionamiento del tanque de carga, tubería de presión, casa de máquinas y la descarga para la micro central hidroeléctrica en la estación científica amazónica Juri Juri Kawsay de la Universidad Central del Ecuador, trabajo de graduación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil opción hidráulica, Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática Carrera de Ingeniería Civil* (Trabajo de Graduación). Universidad Central del Ecuador.
- González, J. (2021). *Reporte de análisis de vibraciones generador 385KVA, Planta San Gerónimo, Hidroimbabura* [Accessed: Aug. 2021]. [http : / / www . mapreinservicios.com](http://www.mapreinservicios.com)
- Grainger. (2025). *Calibrador de grosor* [Accedido: Aug. 08, 2025]. [https : / / www . grainger . com / producto / STARRETT - Calibrador - de - Grosor / p / 5UAC6](https://www.grainger.com.mx/producto/STARRETT-Calibrador-de-Grosor/p/5UAC6)
- H., A. K., & Hirani, B. S. (2000). *Comprehensive design methodology for an engine journal bearing* [Accessed: Aug. 12, 2025]. [https : // www . researchgate . net / figure / Suggested - running - clearances - 33 \\_ tbl2 \\_ 245388867](https://www.researchgate.net/figure/Suggested-running-clearances - 33 _ tbl2 _ 245388867)
- Ingeniería y diseño de maquinaria industrial. (2025). *Ajustes y tolerancias en el diseño de elementos de máquinas* [Accedido: Aug. 08, 2025]. [https : / / esingenieria . pro / ajustes - y - tolerancias - en - el - diseno - de - elementos - de - maquinas](https://esingenieria.pro/ajustes-y-tolerancias-en-el-diseno-de-elementos-de-maquinas)
- Jang, J. Y., & Khonsari, M. M. (2015). On the characteristics of misaligned journal bearings. *Lubricants*, 3(1), 27. [https : // doi . org / 10 . 3390 / lubricants3010027](https://doi.org/10.3390/lubricants3010027)
- Kumar, R. P. S. P. (2010). Study of cavitation in hydro turbines—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 374-383.
- Mantilla, R. M. (2017). *ANÁLISIS DE LA POLÍTICA ENERGÉTICA Y LA DINÁMICA DE LAS HI*

*DROELÉCTRICAS EN EL ECUADOR: 2011-2017* [221AD].

OLADE & ONUDI (Organización Latinoamericana de Energía y Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial). (1985). *Manual técnico para diseño, fabricación y estandarización de equipos para pequeñas centrales hidroeléctricas, Reguladores oleo-mecánicos de velocidad* (Vol. IV).

Organización Latinoamericana de Energía. (1981). *Reguladores de velocidad de turbinas hidráulicas*.

Ortiz Flórez, R., Sánchez Barón, V. H., & Collazos Pino, A. (2017). *Microcentrales hidroeléctricas con aplicación de máquinas reversibles* (Informe Técnico).

Pacheco, H. (2019). *Automatización del sistema de regulación de velocidad de la mini central hidroeléctrica de Coline, en Marcapata: Tesis, para optar al título profesional de Ing. Electricista, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco* [Accessed: Aug. 13, 2025]. [https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/5157/253T20190863\\_TC.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/5157/253T20190863_TC.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Piñeiros, K. (2023). Instructivo de montaje a utilizarse en el mantenimiento de una turbina tipo Francis.

Quintero, D., & Cardoza, D. (2012). *Modernización del sistema de mando y regulación de velocidad de una turbina Francis en la central de Rio Cali: Trabajo de grado presentado para optar por el título de ingeniero electricista, Universidad del Valle* [Accessed: Aug. 13, 2025]. [https://www.academia.edu/41838740/Modernizaci%C3%B3n\\_del\\_sistema\\_de\\_mando\\_y\\_regulaci%C3%B3n\\_de\\_velocidad\\_de\\_una\\_turbina\\_Francis\\_en\\_la\\_central\\_de\\_R%ADo\\_Cali\\_recurso\\_electr%C3%B3nico](https://www.academia.edu/41838740/Modernizaci%C3%B3n_del_sistema_de_mando_y_regulaci%C3%B3n_de_velocidad_de_una_turbina_Francis_en_la_central_de_R%ADo_Cali_recurso_electr%C3%B3nico)

S. L. Belgicast Internacional. (2012). *Válvulas de Mariposa* [Accessed: Aug. 16, 2023].

Stefanelli, E. (2025). *Comparador de carátula en centé-*

- simas de milímetro y milésimas de pulgada* [Accedido: Aug. 08, 2025]. <https://www.stefanelli.eng.br/es/download-comparador-caratula-milimetro-pulgada>
- T., S., D., & Engineering, E. (2025). *Energía hidráulica, la primera renovable* [Accessed: Aug. 05, 2025]. <https://eadic.com/blog/entrada/energia-hidraulica-la-primera-renovable>
- Toapanta, M. (2019). *Plan de control y aseguramiento de la calidad para la recuperación de un rodete de turbina Francis de una central hidroeléctrica* (inf. téc.). No especificada.
- Vallés, L. E., Michielli, L. A., & Salguero, A. R. (2003). *Determinación de la distribución de esfuerzos y sus influencias durante la vida útil del sello para la bomba KSB ETA 32-200* [Accessed: Aug. 06, 2025]. <https://www.redalyc.org/pdf/707/70710308.pdf>
- Velasco Morillo, E. O. (2023). *Desarrollo de un mallaado para una turbina tipo Francis de eje horizontal con características similares a las turbinas de Hidroimbabura* (Informe Técnico).
- Vijayaragavan, B., Asok, S. P., & Marichelvam, M. K. (2025). Optimizing the labyrinth geometric parameters and modelling a new twin seal configuration for improved sealing efficiency in gas turbines. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmech.2025.1440903>
- Viteri, C. (1988). *Reguladores de velocidad eléctrico-electrónicos con control positivo de flujo: Apuntes para un manual técnico de diseño, estandarización y fabricación de equipos para pequeñas centrales hidroeléctricas* (Vol. V). Organización Latinoamericana de Energía (OLADE).
- y Generadores, M. M. (2025). *Alineación motor - acople - carga* [Accessed: Aug. 08, 2025]. <https://motoresygeneradores.com/alineacion-motor-acople-carga>





**EOE**  
**EDITORIAL**  
**UTN**  
IBARRA - ECUADOR

ISBN: 978-9942-572-21-9



9 789942 572219