



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**REACONDICIONAMIENTO DE TURBINA FRANCIS DE HIDROELÉCTRICA
ZUNIL MUNICIPALIDAD DE QUETZALTENANGO**

Vinicio Enrique Chávez Rosales
Asesorado por el Ing. José Ismael Veliz Padilla

Guatemala, enero de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**REACONDICIONAMIENTO DE TURBINA FRANCIS DE HIDROELÉCTRICA
ZUNIL MUNICIPALIDAD DE QUETZALTENANGO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

VINICIO ENRIQUE CHÁVEZ ROSALES

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ ISMAEL VELIZ PADILLA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, ENERO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
EXAMINADOR	Ing. Byron Giovanni Palacios Colindres
EXAMINADOR	Ing. Sergio Torres Hernández
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

REACONDICIONAMIENTO DE TURBINA FRANCIS DE HIDROELÉCTRICA ZUNIL MUNICIPALIDAD DE QUETZALTENANGO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha octubre de 2011.



Vinicio Enrique Chávez Rosales

Guatemala, 25 de octubre de 2012

Ingeniero.
Julio Cesar Campos Paiz
Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Director:

Por este medio me dirijo a usted, para informarle que he llevado a cabo la revisión final del trabajo de graduación titulado **REACONDICIONAMIENTO DE TURBINA FRANCIS DE HIDROELÉCTRICA ZUNIL MUNICIPALIDAD DE QUETZALTENANGO**, presentado por el estudiante *Vinicio Enrique Chávez Rosales* carné No. **2005-15864**.

El trabajo se ha desarrollado de acuerdo con el programa y los objetivos iniciales planteados y considero que llena los requisitos para ser aprobado como trabajo de graduación.

Finalmente, considero importante resaltar la utilidad que el trabajo tendrá como apoyo a los estudiantes de la carrera de ingeniería mecánica en el curso de Máquinas hidráulicas y en la carrera de ingeniería civil en el área de Hidráulica.

Agradeciendo la atención a la presente aprovecho la oportunidad de suscribirme de usted.

Atentamente.



Ing. José Ismael Veliz Padilla
Colegiado No. 3646

José Ismael Veliz Padilla
INGENIERO MECÁNICO
COL. 3646

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

El Coordinador del Área Complementaria, de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado REACONDICIONAMIENTO DE TURBINA FRANCIS DE HIDROELÉCTRICA ZUNIL MUNICIPALIDAD DE QUETZALTENANGO del estudiante Vinicio Enrique Chávez Rosales, recomienda su aprobación.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Carlos Humberto Pérez Rodríguez'.

Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador de Área



Guatemala, noviembre de 2012.

/behdei.

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación del Coordinador del Área Complementaria al Trabajo de Graduación titulado **REACONDICIONAMIENTO DE LA TURBINA FRANCIS DE HIDROELÉCTRICA ZUNIL MUNICIPALIDAD DE QUETZALTENANGO**, del estudiante **Vinicio Enrique Chávez Rosales**, procede a la autorización del mismo.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Julio César Campos Paiz
DIRECTOR



Guatemala, enero de 2013

JCCP/behdei



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **REACONDICIONAMIENTO DE TURBINA FRANCIS DE HIDROELÉCTRICA ZUNIL MUNICIPALIDAD DE QUETZALTENANGO**, presentado por el estudiante universitario: **Vinicio Enrique Chávez Rosales**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 25 de enero de 2013

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Ser Supremo que nos da el poder para ser y hacer.

Mis padres

Mario Chávez y Janeth Rosales. Por su apoyo incondicional para el logro de mis objetivos.

Mis hermanos

Mario David y Janeth Chávez Rosales. Por su estímulo constante.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por compartir el saber para el logro de este objetivo.
Facultad de Ingeniería	Por darme las herramientas para construir un país mejor.
José Ismael Veliz	Por su excelente enseñanza y asesoría en la realización de mi tesis.
Administración Hidroeléctrica Zunil	Por permitirme documentar mi proyecto.
Elvis Álvarez y Carlos García.	Por colaborar de una forma notable en la ejecución de mis proyectos.
Familiares y amigos	Que de una u otra forma me dieron fuerzas para seguir.

3.	CAVITACIÓN	21
4.	FUNCIONAMIENTO HIDROELÉCTRICA DE ZUNIL.....	25
4.1.	Captación	25
4.2.	Canal.....	25
4.3.	Desarenador	26
4.4.	Tanque de presión	28
4.5.	Tubería de presión	31
4.6.	Casa de máquinas	32
4.6.1.	Elementos de la casa de máquinas.....	33
4.6.1.1.	Válvula.....	33
4.6.1.2.	Turbina	34
4.6.2.	Caracterización del equipo existente en hidroeléctrica Zunil	35
4.6.2.1.	Ficha técnica de la turbina.....	35
4.6.2.2.	Ficha técnica del generador	36
4.6.2.3.	Volante de inercia.....	36
4.6.2.4.	Subestación.....	37
4.6.2.5.	Puente grúa.....	37
5.	PROCEDIMIENTO DE DESARMADO.....	39
5.1.	Identificación de los diferentes componentes que integran la turbina	39
5.2.	Desarmado total de turbina	39
6.	DIAGNÓSTICO Y REACONDICIONAMIENTO DE LA TURBINA FRANCIS	41
6.1.	Evaluación del rodete.....	41
6.2.	Reacondicionamiento del rodete	42

6.3.	Evaluación del gobernador o distribuidor Fink.....	44
6.4.	Reacondicionamiento del gobernador	45
6.5.	Evaluación de espaciadores y tapaderas	47
6.6.	Reacondicionamiento de espaciadores y tapaderas	48
6.7.	Evaluación de chumaceras.....	49
6.8.	Reacondicionamiento de chumaceras.....	50
6.9.	Evaluación de eje central.....	51
6.10.	Reacondicionamiento de eje central.....	52
6.11.	Evaluación de tubo de desfogue	53
6.12.	Reacondicionamiento de tubo de desfogue.....	53
6.13.	Resultado final del reacondicionamiento en términos de eficiencia.....	54
CONCLUSIONES		55
RECOMENDACIONES.....		57
BIBLIOGRAFÍA.....		59

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Rueda hidráulica.....	1
2.	Motor hidráulico de acción.	2
3.	Motor hidráulico de reacción.	3
4.	Tipos de turbinas de reacción	10
5.	Descripción de turbina Francis.....	11
6.	Gobernador o distribuidor Fink.....	13
7.	Evolución del rodete de reacción según n_s	15
8.	Limites de aplicación de las turbinas.....	17
9.	Carta de aplicación de turbinas.....	17
10.	Obra de captación.....	25
11.	Canal.....	26
12.	Desarenador de lavado continuo	28
13.	Rejillas de desbaste	29
14.	Compuertas.....	29
15.	Tanque de presión	30
16.	Tubería de presión	32
17.	Casa de máquinas vista en perspectiva.....	33
18.	Válvula de compuerta	34
19.	Rodete.....	41
20.	Reparación de alabes	42
21.	Pista de ajuste.....	43
22.	Rodete y eje.....	43
23.	Paletas del gobernador	44

24.	Soportes, bielas y manivelas del gobernador	45
25.	Reparación de paletas del gobernador	45
26.	Reparación de paletas o álabes directrices	46
27.	Paletas o alabes directrices reacondicionados	46
28.	Reacondicionamiento de soportes de álabes directrices	47
29.	Espaciadores y tapaderas	48
30.	Reacondicionamiento de tapaderas y sus bujes.....	49
31.	Chumaceras	50
32.	Reacondicionamiento de chumaceras.....	50
33.	Limpieza sistema de enfriamiento	51
34.	Eje central.....	52
35.	Reacondicionamiento de eje central.....	52
36.	Tubo de desfogue.....	53
37.	Reacondicionamiento de tubo de desfogue.....	54

TABLAS

I.	Características de la turbina	35
II.	Datos técnicos del generador	36
III.	Resultado final del reacondicionamiento en términos de energía generada.....	54

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
CDT	Carga dinámica total
cm	Centímetros
H	Altura neta
kVA	Kilovoltiamperio
kW	Kilowatt
m	Metro
n	Revoluciones
n_s	Número específico de revoluciones
Pa	Potencia útil
Q	Caudal
rpm	Revoluciones por minuto
s	Segundo

GLOSARIO

Álabes directrices o paletas directrices	Álabes que giran sobre su eje, para regular el flujo o del agua que entra en la turbina Francis.
Casa de máquinas	Recinto donde se encuentra instalado el conjunto de la turbina y generador.
Cavitación	Formación y colapso violento de burbujas dentro de un fluido.
Cilindrado	Consiste en el mecanizado exterior o interior al que se someten las piezas que tienen mecanizados cilíndricos.
Desarenador	Donde el agua pierde velocidad y de esta manera los sólidos que lleve tienden a decantar en el fondo del mismo.
Dique	Lugar en donde se almacena el agua, río arriba, antes de la toma.
Eficiencia	Es la relación entre energía que se produce al final de la conversión en comparación con la energía que entra originalmente en la planta.

Erosión	Proceso de pérdida de material, provocado por la incidencia de partículas sólidas sobre una superficie.
Golpe de ariete	Onda de presión que se produce por un cierre brusco de una compuerta y parada de la corriente de agua, mediante una vibración ruidosa.
Mantenimiento	Actividades dirigidas a prever y asegurar el funcionamiento normal, la eficiencia y la buena apariencia de los equipos.
Metalizado	Es el nombre genérico para una técnica de revestimiento de metal sobre la superficie de otro objeto.
Planta hidroeléctrica	En general, es aquella en que se convierte la energía de movimiento y caída de un río en corriente eléctrica aprovechable para la industria, iluminación, fuerza motriz, etc.
Reacondicionamiento	Consiste en restaurar una pieza dañada, con el objetivo de que vuelva a ser utilizable y extienda su vida de servicio.
Rectificado	Trabajo realizado para ajustar las dimensiones y superficie de una pieza a sus medidas deseadas, eliminando las irregularidades.

Refrentado	Consiste en un mecanizado frontal y perpendicular al eje de las piezas que se realiza para producir un buen acoplamiento en el montaje posterior de las piezas torneadas.
Rodete	Elemento móvil de la turbina o rotor, consiste en un disco perpendicular al eje de giro, compuesto por álabes curvados en dirección contraria al movimiento.
Salto de agua	Paso brusco o caída de masas de agua desde un nivel a otro inferior. Numéricamente se identifica por la diferencia de altura que se da en metros.
Tubería de presión	Esta se inicia en la toma de agua y termina inmediatamente antes de la turbina y es en donde el agua tiene su mayor caída. Está construida de acero para soportar las altas presiones.
Turbinas tipo Francis	Turbina hidráulica de reacción, es decir, que el fluido sufre un cambio de presión importante en su paso a través de rodete. Se aprovecha la energía potencial del agua y se transforma en energía cinética rotacional.

Turbomáquina

Máquina cuyo elemento principal es un rodete o rotor, a través del cual pasa un fluido de forma continua, cambiando éste su cantidad de movimiento por acción de la máquina, dándose así una transferencia de energía entre la máquina y el fluido, la cual puede ser en sentido máquina-fluido o fluido-máquina.

RESUMEN

Al considerar que el planeta tierra cada día se encuentra más contaminado y con limitadas iniciativas para evitar su deterioro excesivo, se deben promover y hacer el mayor de los esfuerzos para llevar a cabo todo tipo de proyectos o actividades que tienen como fin, el adecuado aprovechamiento y uso responsable de los recursos naturales existentes en Guatemala.

De este tipo de proyectos se puede mencionar el realizado a la turbina hidráulica de la hidroeléctrica Zunil de la Municipalidad de Quetzaltenango, que su fin primordial fue el reacondicionamiento total de este equipo hidráulico logrando con esta actividad, hacer un buen uso del recurso natural y recuperar la eficiencia del equipo que se había perdido por la falta de mantenimiento e inversión.

En el presente trabajo no se presenta la teoría del diseño de turbinas, que es un tema altamente especializado, sino más bien una exposición de los principios simples y fundamentales en los cuales se basa el diseño y operación de las turbinas, como también ilustrar las actividades de mantenimiento preventivas que se deben considerar y llevar a cabo para lograr que turbinas Francis como la de hidroeléctrica de Zunil logren aumentar y recuperar la eficiencia perdida.

Los trabajos ejecutados llevan a esta turbina Francis a aumentar su generación por arriba de un 40% con respecto a lo generado antes de realizar las actividades de mantenimiento.

Estas actividades han sido documentadas el mantenimiento básico que debe realizarse al equipo hidráulico. Dichas actividades son ilustradas de manera clara hacia el lector con el objetivo de ampliar su conocimiento en el tema de mantenimiento preventivo y correctivo a hidroeléctricas cuya generación de energía debe ser promovida por ser de manera limpia y renovable.

OBJETIVOS

General

Lograr que la eficiencia de la turbina hidráulica alcance valores muy cercanos al dado por el fabricante luego de realizado el trabajo de reacondicionamiento. Este incremento en la eficiencia se verá reflejado en el aprovechamiento de la energía presente en el agua para la generación de energía eléctrica para el cual fue diseñado dicho equipo hidráulico.

Específicos

1. Proveer de un historial que documente las actividades realizadas en el reacondicionamiento del equipo hidráulico en la planta hidroeléctrica de Zunil.
2. Describir las actividades de mantenimiento correctivas necesarias para lograr recuperar una turbina hidráulica tipo Francis de eje horizontal.
3. Proveer un documento de referencia a los estudiantes y profesionales para la realización de un mantenimiento a una turbina Francis de eje horizontal.
4. Establecer los elementos de la turbina Francis de eje horizontal que ameritan un continuo chequeo y su debido mantenimiento, ya que su deterioro se ve reflejado en la caída de su eficiencia.

5. Visualizar el antes y el después de realizadas las actividades de mantenimiento aplicadas a la turbina Francis de la hidroeléctrica Zunil.

INTRODUCCIÓN

Las emisiones de los gases de efecto invernadero generado por la quema de combustibles fósiles utilizados en su mayoría para la generación de energía eléctrica, es uno de los factores que están afectando el medio ambiente es por eso que no puede dejar de aprovechar los recursos renovables que se encuentran existentes en el planeta y ni mucho menos en Guatemala, ni permitir que estos desaparezcan por el uso desmedido y la destrucción de su entorno.

Las hidroeléctricas aprovechan la energía potencial que posee la masa de agua, energía hidráulica, para poder generar energía eléctrica de manera limpia, renovable y gratuita con la cual no degrada el medio ambiente con la emisión de gases de efecto invernadero.

Como parte del equipo existente en las hidroeléctricas se encuentra un convertidor de la energía hidráulica a energía mecánica, siendo este equipo la turbina hidráulica, la cual opera con una alta eficiencia y permite el mayor aprovechamiento de la energía hidráulica. Toda turbina con su uso en el transcurrir de los años, sufren desgastes y desajustes los cuales infieren directamente en su eficiencia. Esta baja en la eficiencia genera grandes pérdidas de energía y por consiguiente una generación eléctrica por debajo de lo esperado.

Tales condiciones de operación ineficiente deben llevar a las autoridades de la hidroeléctrica a realizar las actividades de mantenimiento necesarias para lograr mantener o aumentar en el peor de los casos la eficiencia pérdida y con

ello aprovechar el recurso energético que se encuentra de manera gratuita, gracias a la ubicación geográfica de las instalaciones de la planta hidroeléctrica.

El presente estudio analizará y documentará todo lo referente a este mantenimiento correctivo, considerado como un reacondicionamiento a la turbina Francis de eje horizontal existente en la hidroeléctrica Zunil de la Municipalidad de Quetzaltenango.

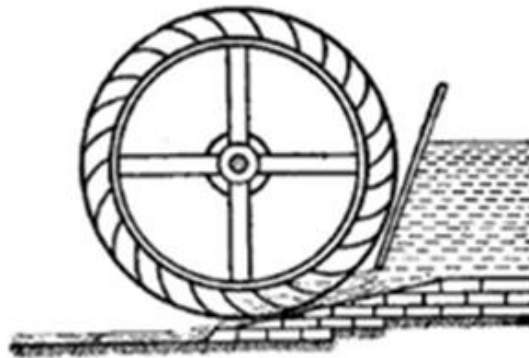
1. TURBINAS HIDRÁULICAS

1.1. Motores hidráulicos

Se denominan, en general motores hidráulicos a los que aprovechan la energía cinética producida por el movimiento del agua al desplazarse entre dos alturas diferentes; es decir, los que aprovechan la energía cinética del agua al caer desde una cota elevada a otra cota más baja.

El más antiguo de los motores hidráulicos es la rueda hidráulica como se ilustra en la figura 1, está constituida por una serie de palas dispuestas en forma de rueda; el agua, al caer, choca contra las palas e impulsa a éstas con lo que se consigue el movimiento de la rueda.

Figura 1. Rueda hidráulica



Fuente: RAMÍREZ VÁSQUEZ, José. Máquinas motrices generadoras de energía eléctrica. p.

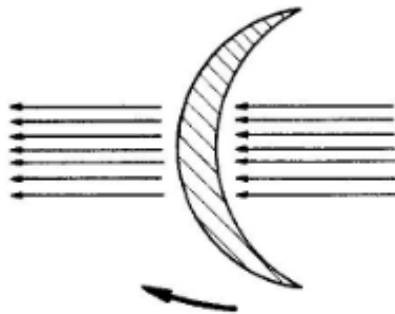
18.

1.2. Motores hidráulicos de acción y de reacción

La primera división que se hace en los motores hidráulicos es tomando como base la dirección que toma el agua al chocar contra las paletas o álabes, que constituyen la rueda motriz o rodete, del motor hidráulico.

Se llamará motores hidráulicos de acción a aquellos en que el chorro de agua que impulsa las paletas no sufre desviación. En la figura 2 se han representado los efectos de un chorro de agua sobre una paleta perteneciente a un motor de acción. El agua choca contra la paleta, y por efecto del choque la paleta se mueve, haciendo girar la rueda en el sentido de la fecha; el chorro de agua escapa en la misma dirección. Pero a la vez, y esto es interesante de recordar, el sentido de giro de la paleta motriz coincide con la dirección del chorro de agua.

Figura 2. Motor hidráulico de acción



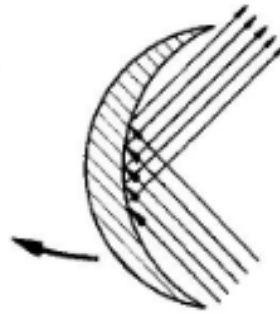
Fuente: RAMÍREZ VÁSQUEZ, José. Máquinas motrices generadoras de energía eléctrica.

p. 19.

En los motores hidráulicos de reacción, la dirección de salida del chorro de agua que impulsa las paletas, no coincide con la dirección de entrada del

mismo chorro. Como se ve en la figura 3 el fundamento de un motor hidráulico de reacción. En esta ocasión, el agua no choca frontalmente, como en el caso de los motores de acción, sino que se desliza a través de la paleta, poniéndola en movimiento, y sale después, habiendo sufrido previamente un cambio en su dirección. La consecuencia más interesante es que el sentido de giro de la paleta motriz no coincide con la dirección del chorro de agua. En efecto, se puede observar en la figura 3 que la paleta tiende a girar hacia la izquierda, mientras que el agua se dirige, a su salida, hacia la derecha

Figura 3. **Motor hidráulico de reacción**



Fuente: RAMÍREZ VÁSQUEZ, José. Máquinas motrices generadoras de energía eléctrica.
p. 19.

La turbina hidráulica es una turbo máquina motora, y por tanto esencialmente es una bomba roto dinámica que trabaja a la inversa.

Así como una bomba absorbe energía mecánica y restituye energía al fluido, una turbina absorbe energía del fluido y restituye energía mecánica. Teóricamente, suministrando energía hidráulica a la maquina, e invirtiendo el flujo, una bomba podría trabajar como turbina. Prácticamente, el rendimiento sería muy bajo, y a veces nulo, exceptuando las máquinas especialmente

diseñadas para trabajar como bomba y como turbina, como es el caso de la máquina doble bomba-turbina de las centrales de bombeo.

1.3. Cronología de las turbinas hidráulicas

- 1827. Fourneyron inventa la primera máquina hidráulica prácticamente utilizable que se transformó posteriormente en turbina de reacción.
- 1841. Henschel. Jonval: Primera turbina axial de reacción con tubo de aspiración.
- 1842. Rueda tangencial de Zuppinger, para grandes saltos y caudales reducidos.
- 1843. Fontaine construyó la turbina Jonval para saltos constantes y caudales variables, trabajando a libre desviación.
- 1848. Schwamkrug: primera turbina parcial para grandes saltos y caudales reducidos.
- 1849. Turbina Francis.
- 1851. Girard perfeccionó la turbina Fontaine, regulando las células consecutivamente asegurando su ventilación y construyendo la turbina parcial.
- 1860. Haenel, Knop y Lehmann construyeron la turbina Girard en forma de turbina límite para caudales y saltos variables.

- 1872. Fink, construye las paletas o álabes directrices, que fue la primera regulación correcta de las turbinas de reacción.
- 1873. Voith construye la primera turbina Francis con paletas Fink.
- 1880. Rueda Pelton.
- 1912. Primeros experimentos con la turbina Kaplan.
- 1925. Puesta en marcha de la primera turbina Kaplan, de grandes dimensiones.

1.4. Clasificación de las turbinas hidráulicas

Las turbinas hidráulicas se pueden clasificar por su grado de reacción y por su número específico de revoluciones, estas características de las turbinas determinan sus condiciones de operación.

1.4.1. Clasificación según el grado de reacción

Las turbinas hidráulicas, según el grado de reacción, se clasifican en dos grupos: turbinas de acción y turbinas de reacción.

Esta clasificación se funda en el concepto de grado de reacción: si el grado de reacción es 0, la turbina se llama de acción. Si el grado de reacción es distinto de 0, la turbina se llama de reacción.

El grado de reacción de una bomba se define así:

$$\text{Grado de reacción} = \frac{\text{Altura de presión comunicada por el rodete}}{\text{altura total comunicada por el rodete}}$$

Análogamente, el grado de reacción de una turbina, se define así:

$$\text{Grado de reacción} = \frac{\text{Altura de presión absorbida por el rodete}}{\text{altura total absorbida por el rodete}}$$

En la turbina de acción la presión del agua no varía en los alabes. El rodete no está inundado y se encuentra a la presión atmosférica. Las turbinas de acción son de admisión parcial.

En la turbina de reacción la presión a la entrada del rodete es superior a la atmosférica y a la salida inferior. El rodete está inundado. Las turbinas de reacción son de admisión total.

1.4.1.1. Turbinas de acción

Solo se construyen prácticamente de flujo tangencial y son las turbinas Pelton.

Las turbinas de impulso o de acción tienen la peculiaridad de aprovechar solamente la energía cinética del fluido; no existe, pues, gradiente de presión entre la entrada y la salida de la máquina. El grado de reacción es cero.

Entre las turbinas hidráulicas de este tipo la más representativa y por así decir, casi la única, es la Pelton, aunque también se podría citar la Michell-Ossberger de chorro cruzado, pero está poco generalizada y su empleo se halla

limitado a muy pequeños aprovechamientos (25 a 2 000 litros/segundo y saltos de 12 a 50 metros).

La turbina Pelton debe su nombre a Lester Allan Pelton (1829-1908) quien buscando oro en California, concibió la idea de una rueda con cucharas periféricas que aprovechara la energía cinética de un chorro de agua, proveniente de una tubería de presión, incidiendo tangencialmente sobre la misma. Ensayó diversas formas de álabes hasta alcanzar una patente de la rueda en 1880, desde cuya fecha ha tenido gran desarrollo y aplicación.

En la turbina Pelton actual la energía cinética del agua, en forma de chorro libre, se genera en una tobera colocada al final de una tubería de presión. La tobera está provista de una aguja de cierre para regular el gasto, constituyendo el conjunto, el órgano de alimentación y de regulación de la turbina.

El álabe tiene la forma de doble cuchara, con una arista diametral sobre la que incide el agua, produciéndose una desviación simétrica en dirección axial, buscando un equilibrio dinámico de la máquina en esa dirección. Por ser el ataque del agua en sentido tangencial a la rueda se la denomina también turbina tangencial; por tener el fluido un recorrido axial a su paso por el álabe, se clasifica también entre las máquinas de tipo axial.

1.4.1.2. Elementos de las turbinas de acción

Tubería forzada, la altura de presión aumenta a costa de la altura geodésica, que disminuye. La altura de velocidad permanece constante, si la sección de la tubería es constante.

Distribuidor, la altura de presión baja a cero (presión relativa) o sea a la altura de presión ambiente (presión absoluta). La altura de velocidad aumenta porque el distribuidor transforma la energía de presión en energía cinética. El aumento de esta última es un poco menor que la disminución de la primera por las pérdidas.

Rodete, la altura de presión permanece constante. Todo el rodete se encuentra a la presión atmosférica. La altura de velocidad disminuye, porque la energía cinética del chorro se va transformando en energía útil en el eje. En estas turbinas no hay tubo de aspiración.

1.4.1.3. Turbinas de reacción

Cuando la turbina es capaz de utilizar la energía estática del agua se llama de reacción, como son la Francis y la Kaplan. El grado de reacción en estas máquinas es siempre inferior a la unidad, lo que quiere decir que también pueden aprovechar la energía dinámica del agua.

1.4.1.4. Elementos de las turbinas de reacción

Tubería forzada, igual que en las turbinas de acción. Si no hay tubería forzada, sino que el agua llega a la turbina por un canal en lámina libre, la altura de presión permanece constante (presión atmosférica).

Distribuidor, la altura de presión disminuye; pero no tanto como en las turbinas de acción.

Rodete, la altura de presión sigue disminuyendo hasta un valor menor que en las turbinas de acción, el rodete transforma energía de presión y cinética en energía útil en el eje.

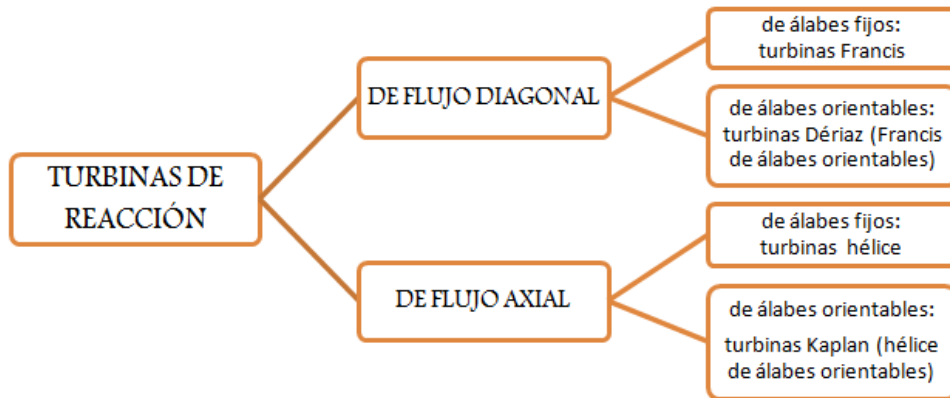
Tubo de aspiración, la energía de presión aumenta desde un valor negativo hasta 0.

1.4.1.5. Tipos de turbinas de reacción

Antes de 1900 las turbinas hidráulicas más empleadas fueron las de Fourneyron, Jonval y Fontaine. Su rendimiento era bajo, sobre todo a cargas reducidas y su velocidad pequeña. A comienzo de siglo se emplearon mucho en Europa las turbinas Girard y la centrípeta de acción.

En la actualidad prácticamente las únicas turbinas que se construyen son las que muestran en la figura 4.

Figura 4. **Tipos de turbinas de reacción**



Fuente: elaboración propia, con base en el cuadro de MATAIX, Claudio. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. p. 463.

1.4.1.6. **Turbinas Francis**

Es un motor hidráulico de reacción, que se emplea para caudales y alturas medios.

La figura 5 representa una turbina Francis lenta construida por la casa Escher-Wyss (los números remiten a la figura):

El número 2 de la figura 5 corresponde al distribuidor que en conjunto con la caja espiral dirigen el agua al rodete con un mínimo de pérdidas, y transforman parte de la energía de presión en energía cinética.

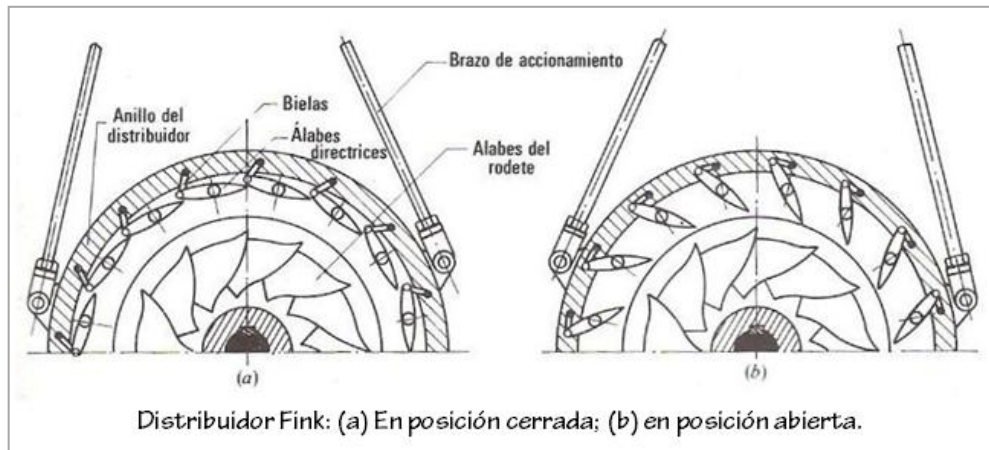
El distribuidor es de álabes orientables y sirve también para reducir el caudal cuando la carga de la turbina disminuye, conservando el mejor rendimiento posible, es decir, reduciendo a un mínimo las pérdidas hidráulicas por fricción y choque.

El distribuidor Fink fue inventado por Fink (Alemania), es el distribuidor común de todas las turbinas de reacción (Francis, hélice, Kaplan y Dériaz). Este distribuidor puede verse en posición cerrada en la figura 6(a) y en posición abierta en la figura 6(b). Consta de dos bielas o brazos robustos, movidos por uno o varios servomotores de aceite que hacen girar al anillo donde pivota un extremo de las pequeñas bielas, las cuales a su vez hacen girar a las paletas o álabes directrices de perfil aerodinámico, que pivotan en torno a un eje fijo.

En las turbinas modernas de gran potencia cada álabe directriz es accionado individualmente por un servomotor y en las pequeñas turbinas raras veces a mano.

El distribuidor Fink sustituye al inyector de las turbinas Pelton y a otras también con distribuidor de álabes fijos.

Figura 6. **Gobernador o distribuidor Fink**



Fuente: MATAIX, Claudio. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. p. 473.

El número 3 de la figura 5 corresponde al rodete que es el rotor, es decir el elemento móvil de la turbina. Consiste en un disco giratorio, compuesto por álabes curvados en dirección contraria al movimiento.

En una turbina Francis, el flujo de agua entra tangencialmente al rodete y sale de él axialmente. El agua que pasa a través del rodete lo hace girar, es decir, que la energía potencial del agua se transfiere al rodete en forma de energía cinética rotacional.

El número 4 de la figura 5 corresponde al tubo de aspiración. En una turbina es el órgano de desagüe, pero se llama tubo de aspiración porque crea una aspiración o depresión a la salida del rodete; mientras que en las bombas constituye la tubería de admisión, y crea también una depresión a la entrada del rodete. Las turbinas de acción, carecen de tubo de aspiración: en ellas el agua sale del rodete directamente de salida.

1.4.2. Clasificación de las turbinas según el número específico de revoluciones

La velocidad específica corresponde al número de revoluciones por minuto que daría una turbina semejante a la que se desea proyectar (de igual forma pero dimensiones reducidas), la cual, instalada en un salto de 1 metro de altura, proporcionaría una potencia de 1 caballo de vapor.

En las turbinas de reacción lo mismo que en las turbinas Pelton el rodete va cambiando insensiblemente de forma de una turbina a otra para adaptarse a las diferentes condiciones de funcionamiento. Estas condiciones son la potencia útil, Pa, la altura neta, H, y el número de revoluciones, n.

La importancia relativa de Pa, H y n en la forma del rodete se expresa por el valor del número específico de revoluciones, n_s :

$$n_s = nPa^{1/2}H^{-5/4}$$

En esta ecuación, n se expresa en revoluciones por minuto, Pa en potencia de caballos de vapor y H en metros.

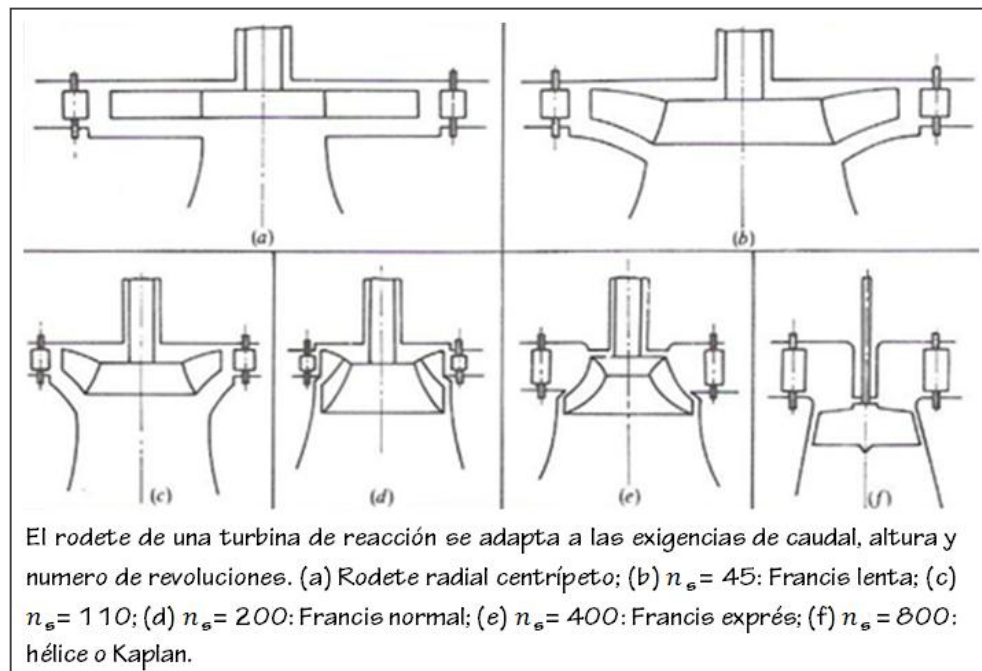
En la figura 7 pueden verse 6 cortes meridionales de 6 rodetes de turbinas de reacción, clasificados según n_s .

El significado de esta clasificación es el siguiente:

Una turbina cualquiera, por ejemplo, la de $n_s = 200$, funcionará con óptimo rendimiento cuando la potencia desarrollada, la altura neta y el número

de revoluciones sean tales que sustituyendo sus valores en la ecuación de n_s se obtenga $n_s = 200$.

Figura 7. **Evolución del rodete de reacción según n_s**



Fuente: MATAIX, Claudio. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. p. 477.

El rodete (a) es de flujo radial. El flujo es radio axial, y cada vez más axial que radial, en (b), (c), (d) y (e). En el rodete (f) el flujo es puramente axial. Así la evolución de la forma es continua; pero cuando la máquina es totalmente axial, el rodete ha adquirido ya la forma de hélice.

Por tanto, la turbina (a) se llama radial. Se construye muy poco (la bomba radial en cambio es muy frecuente). Las turbinas (b), (c), (d) y (e) se llaman Francis. Son de flujo radioaxial. La turbina (f) se llama turbina hélice: es de flujo axial.

Las turbinas de reacción cubren una gama grande de número específico de revoluciones, $n_s = 60$ a n_s por encima de 1 000 son corrientes, como ya hemos dicho, las denominaciones de turbinas Francis lentas, normales, rápidas y exprés. Estas últimas son ya casi axiales. Suelen llamarse Francis normales aquellas cuyo n_s está comprendido entre 125 y 300. Así pues, en la figura 7(d) representa una Francis normal.

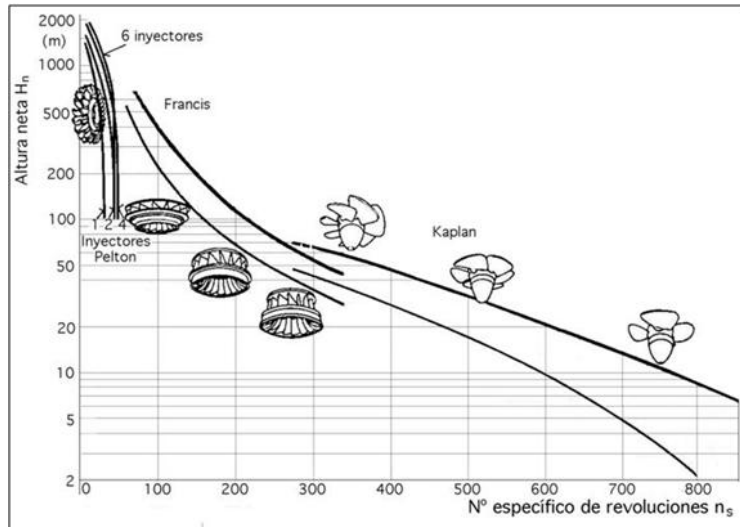
Insistimos una vez más en que el término rápido o lento no se refiere al número real de revoluciones, sino al número específico de revoluciones.

De hecho las turbinas lentas (Pelton lentas) suelen girar a un número de revoluciones mayor, porque se instalan en saltos de mucha altura. Sin en este mismo salto se instalará una máquina rápida iría a una velocidad excesiva. Por el contrario, las turbinas rápidas (de hélice rápidas) suelen girar muy lentamente, a veces a menos de 80 revoluciones por minuto. Si en ese mismo salto se instalará una máquina lenta giraría tan lentamente que su velocidad sería prácticamente irrealizable. De ahí la necesidad ha existido de desarrollar turbinas muy lentas y muy rápidas.

La figura 8 muestra los límites de aplicación de las turbinas Pelton, Francis y Kaplan de acuerdo a la carga y la velocidad específica.

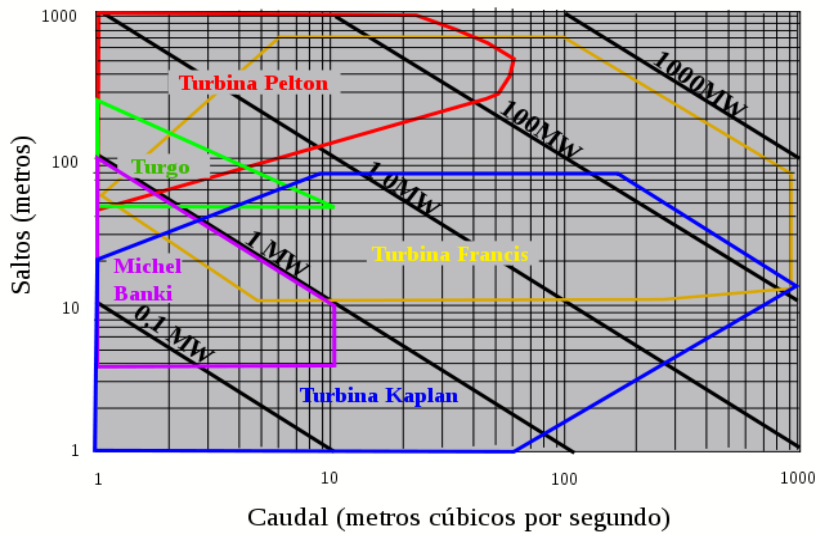
La figura 9 muestra la aplicación de las turbinas Pelton, Francis y Kaplan de acuerdo al salto y caudal.

Figura 8. Límites de aplicación de las turbinas



Fuente: ENCINAS, Manuel Polo. Turbomáquinas hidráulicas: principios fundamentales. p. 115.

Figura 9. Carta de aplicación de turbinas



Fuente: Wikipedia. http://es.wikipedia.org/wiki/Turbina_hidr%C3%A1ulica. Consulta: 23 de octubre de 2012.

2. FACTORES DE PÉRDIDA DE ENERGÍA

Como causas principales de pérdida de energía pueden citarse las siguientes:

Pérdidas por fricción, sobre las paredes de los contornos; estas varían directamente con el cuadrado de la velocidad relativa y con la longitud del ducto o canal por donde se mueve el fluido, siendo inversamente proporcionales al radio hidráulico de la sección de dicho ducto. También intervienen la viscosidad del fluido y la rugosidad de las paredes.

Pérdidas por separación del fluido de los contornos de los álabes o por choques contra los mismos, produciéndose turbulencias o vibraciones perjudiciales. Este efecto tiene lugar, por ejemplo, en la operación a carga parcial o sobrecarga en las máquinas de álabe fijo, al modificarse la incidencia con la regulación del caudal.

La máquina, ya sea bomba o turbina, está ligada rígidamente a otra máquina de velocidad angular constante (motor o generador) y para modificar la potencia de acuerdo con la demanda, se regula el gasto, cambiando en magnitud o dirección la velocidad absoluta de entrada al rotor; pero como la velocidad de arrastre permanece constante, necesariamente la velocidad relativa se sale de la posición tangente que debe tener respecto el álabe, produciéndose la separación o choque contra el mismo. Desde luego, la separación se produce en el borde de ataque del álabe, al modificarse el ángulo de incidencia y para velocidades subsónicas del fluido.

En el caso de velocidades supersónicas, como sucede en algunas máquinas que trabajan con aire, gas o vapor, la separación se presenta en el borde de fuga del álabe debido a una gradiente de presión adversa que se crea en virtud de una interacción entre la onda de choque que se genera en la parte convexa del álabe y la capa de contorno en la zona de salida del álabe. Esta separación da lugar a turbulencias que aumentan la fuerza de arrastre del álabe. Esta separación da lugar a turbulencias que aumentan la fuerza de arrastre del álabe, disminuyendo el rendimiento. Este efecto obliga a limitar el valor del cambio en las velocidades relativas del fluido y a sacrificar la energía estática transferida por este concepto.

Pérdidas por recirculación del fluido entre el rotor y la carcasa, el rotor al girar dentro de la carcasa llena de fluido produce una verdadera centrifugación de las partículas que están en su contacto periférico, dando lugar a una corriente circulatoria que sigue al rotor en su movimiento. En ciertas máquinas hidráulicas se ha podido comprobar que la velocidad angular de esta corriente llega a ser la mitad de la del rotor. Varía de unas máquinas a otras, siendo evidente una pérdida energética a causa de esta recirculación del fluido.

Pérdidas por fugas, resulta difícil evitar las fugas del fluido entre las partes móviles y las fijas de una turbomáquina, pues si se fuerza la presión sobre los sellos de ajuste, se aumenta el efecto abrasivo sobre los mismos y se acelera su destrucción, además de producir un frenado que reduce el rendimiento. Preferible es tolerar una ligera fuga, en muchos casos, como en las máquinas hidráulicas, que ayude a mantener húmedos los sellos, no sólo para la protección de estos, sino también para favorecer el deslizamiento y mejorar las condiciones de funcionamiento.

3. CAVITACIÓN

Si las máquinas que trabajan con aire, gas o vapor, están sujetas a fenómenos elásticos a causa de ser estos fluidos compresibles, las máquinas hidráulicas, no sufren este problema, pues el agua es un líquido prácticamente incompresible dentro de las condiciones de trabajo en las mismas. Sin embargo, tienen también limitada su velocidad por la cavitación.

El nombre viene significando la formación de cavidades en el seno del líquido, definidas por burbujas de vapor dentro de la masa líquida y producidas por una vaporización local a causa de ciertas condiciones dinámicas, como pueden ser una alta velocidad relativa y consecuentemente una reducción de la presión local hasta el valor de la tensión del vapor a la temperatura actual del líquido. Estas condiciones suelen presentarse en la parte convexa de los álabes que confinan la zona de succión de una bomba o de descarga de una turbina, así como en la región periférica del rodete móvil donde las velocidades tangenciales son altas. En general, en todo punto en que se produzca una aceleración local suficiente para reducir la presión al valor del de vaporización.

La cavitación disminuye el rendimiento hidráulico, pero el efecto más grave es la erosión de los álabes, que se acentúa más y más una vez iniciada, obligando a revisiones periódicas de la máquina y a la reparación de la parte afectada.

El resane de los álabes suele hacerse con soldadura, siendo esta operación muy delicada, pues se han de evitar en lo posible tensiones internas en el material que den lugar a concentraciones de esfuerzos nocivos, así como

desequilibrios mecánicos por desajuste de masas que produzcan vibraciones. La falta de masa local, producida por la cavitación, puede dar lugar también a vibraciones del rotor. En algunas instalaciones se han empleado con éxito resinas epoxy para rellenar las partes erosionadas por la cavitaciones.

El fenómeno de cavitación ha sido objeto de muchos estudios y la explicación es aún motivo de controversia. Una teoría expuesta por Harvey y desarrollada más tarde por Knapp sostiene que en el seno del líquido se encuentran un número de núcleos gaseosos pequeños e indisolubles localizados en cavidades de pequeñas partículas sólidas y le impiden soportar tensión, comenzando la cavitación.

Un líquido perfectamente homogéneo mantiene una tensión alta y soporta un estado estable aunque descienda la presión al valor de la vaporización de acuerdo con la temperatura actual del líquido. Los núcleos más grandes acentuarán la discontinuidad y acelerarán la cavitación. La presencia de una capa de contorno parece facilitar este crecimiento. Esta teoría, aunque tentativa, explica varios tipos de cavitación que ocurren en condiciones semejantes, no solamente respecto a las propiedades macroscópicas del cuerpo inmerso en el líquido, sino también respecto a las propiedades microscópicas del mismo líquido.

Una burbuja de vapor formada por una reducción local de la presión eventualmente se destruye cuando es arrastrada a una zona de más alta presión y este colapso instantáneo de la burbuja produce una onda de presión que se transmite a través del líquido, alcanzando la superficie del material del álabe. Asociada con la alta presión de impacto se tiene una temperatura local elevada, la combinación de las cuales puede ser suficiente para deteriorar el material. La acción química se ha querido señalar como causa del ataque

metálico, pero aunque puede ser un factor que contribuye a la erosión del álabe, se ha observado que los efectos de cavitación se presentan aun en materiales neutros como plomo y vidrio.

La cavitación es esencialmente un proceso inestable, ya que la onda de presión debida al colapso de la burbuja eleva momentáneamente el nivel de presión local, con lo que la cavitación cesa. El ciclo se repite y al frecuencia puede ser muy alta (hasta por encima de 25 000 ciclos por segundo). Se entiende que bajo tales condiciones de fluctuación el líquido es sacudido y empujado hacia los poros de metal, produciendo compresiones locales que sobrepasan la resistencia del material y dañan las áreas afectadas.

Por otra parte, la acumulación de bolsas de vapor relativamente grandes perturba el campo de flujo y reducen el rendimiento.

Al diseñar una máquina y proyectar su instalación debe procurarse que la cavitación no llegue a producirse, al menos en grado notable. Bien es sabido que esto obliga a reducir velocidades de operación y a aumentar el peso y tamaño por unidad de potencia, así como a cuidar la posición de las turbinas respecto al nivel de aguas abajo, y la de las bombas respecto al nivel de succión.

4. FUNCIONAMIENTO HIDROELÉCTRICA DE ZUNIL

4.1. Captación

Capta el recurso del afluente para luego almacenarlo en una presa, aprovechando el caudal que hay en el río Salamá, como se muestra en la figura 10, el volumen de agua almacenada en la presa garantiza la operación constante de la turbina.

Figura 10. **Obra de captación**



Fuente: Hidroeléctrica de Zunil.

4.2. Canal

El caudal que será aprovechado para generar energía eléctrica es captado en la bocatoma y llevado a través de un canal a cielo abierto. El agua es conducida primeramente al desarenador y luego al tanque de presión, como se ilustra en la figura 11.

Para evitar el rebosamiento del caudal por encima de las paredes del canal abierto, generado por el aumento súbito del caudal o por el taponamiento del canal debido a la erosión, se construyen a lo largo del tramo aliviaderos, obras de seguridad que vierten las excedencias de caudal de nuevo al afluente.

Figura 11. **Canal**



Fuente: Hidroeléctrica de Zunil.

4.3. Desarenador

El desarenador es una obra hidráulica que sirve para sedimentar partículas de material sólido suspendidas en el agua, en el interior de la conducción. Las partículas se mantienen en suspensión debido a que la velocidad de entrada en la bocatoma es elevada y suficiente para arrastrar partículas sólidas; en especial durante las crecidas puede entrar gran cantidad de sedimentos.

No disponer del desarenador genera daños en las obras, por ejemplo:

- Disminución de la sección de la conducción (canal) por sedimentación; esto conlleva a aumentar el mantenimiento de la obra.
- Disminución de la capacidad del tanque de presión por acumulación de material sólido, debido a la sedimentación, ocasionada por la baja velocidad existente en esta obra.
- Cuanto mayor es la velocidad de las partículas, éstas desgastan más rápidamente la tubería y las turbinas, disminuyendo de manera considerable su vida útil.

El propósito del desarenador consiste en eliminar partículas de material sólido suspendidas en el agua de la conducción, debido a la velocidad del agua; para que ellas se decanten se disminuye su velocidad; en consecuencia, para cumplir con su propósito el desarenador dispone de una mayor área.

La hidroeléctrica de Zunil cuenta con un desarenador de lavado continuo, como se ilustra en la figura 12, el cual elimina en forma continua el material depositado; para ello siempre se requiere que el caudal disponible sea mayor que el de diseño.

El desarenador de lavado continuo se divide en dos cámaras, superior e inferior. La cámara inferior está situada en el fondo y contiene los sedimentos más pesados, encauzados a una galería longitudinal de pequeña sección para su vertimiento al afluente. La cámara superior es donde se produce la sedimentación está encima y tiene una sección grande.

Figura 12. **Desarenador de lavado continuo**



Fuente: Hidroeléctrica de Zunil.

4.4. Tanque de presión

La cámara de presión es un tanque con capacidad suficiente para garantizar la partida o parada brusca de la turbina; está conectada al canal por medio de una transición, de la cual el agua pasa a la tubería de presión a través de una rejilla que evita la entrada de elementos sólidos flotantes, como se ilustra en la figura 13.

Figura 13. **Rejillas de desbaste**



Fuente: Hidroeléctrica de Zunil.

Entre la rejilla y la tubería se instala una compuerta de cierre al paso de agua. Entre la compuerta y la rejilla se dejan unas ranuras en las paredes para la instalación de compuertas de apoyo como elemento de seguridad para el caso de reparaciones, ilustrado en la figura 14.

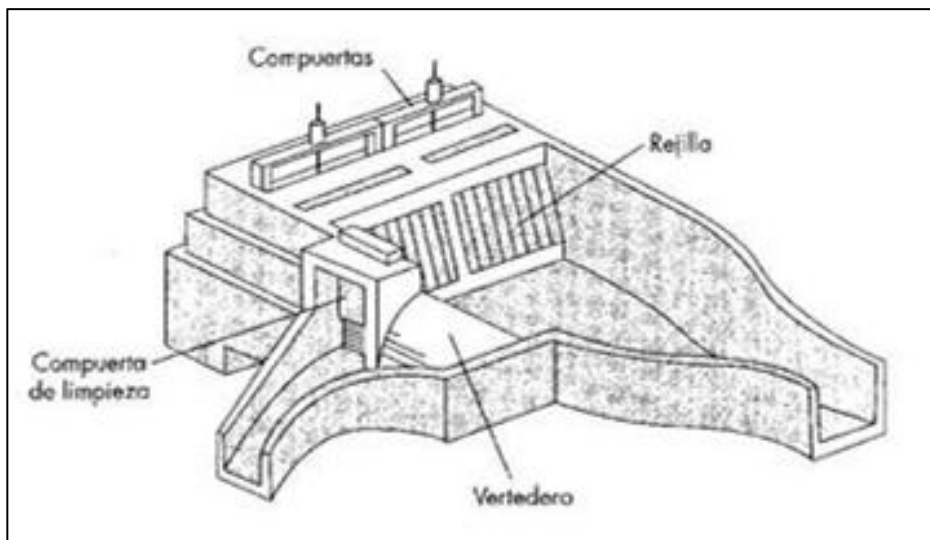
Figura 14. **Compuertas**



Fuente: Hidroeléctrica de Zunil.

Los excesos de agua en la cámara se vierten a través de un aliviadero ubicado en una de las paredes, el cual está acompañado de una compuerta de fondo que permite su vaciado y el lavado de sedimentos. El aliviadero y la compuerta se conectan a un canal común que lleva el agua al río donde es mínima la erosión. Una apreciación de las características de la cámara de presión se observa en las figura 15.

Figura 15. **Tanque de presión**



Fuente: FLORES ORTIZ, Ramiro. Pequeñas centrales hidroeléctricas. p. 196.

La cámara de presión cumple con las siguientes funciones:

- Crea un volumen de reserva de agua que permite satisfacer las necesidades de las turbinas durante los aumentos bruscos de demanda.
- Impide la entrada a la tubería de presión de elementos sólidos de arrastre y flotantes.

- Produce la sedimentación de los materiales sólidos en suspensión en el canal y permite su eliminación.
- Desaloja el exceso de agua en las horas en las que el caudal de agua consumido por las turbinas es inferior al caudal de diseño.
- Mantiene sobre la tubería una altura de agua suficiente para evitar la entrada de aire.
- Dispone de un volumen que le permite amortiguar el golpe de ariete, originado por las paradas bruscas.
- En partida brusca garantizar que no entre aire en la tubería de presión.
- En parada brusca garantizar la estabilidad funcional de la cámara de presión y del canal de conducción.

4.5. Tubería de presión

La conducción a presión se encarga de llevar las aguas desde el tanque de presión hasta la turbina, en donde la energía cinética es transformada en energía mecánica. La conducción a presión está conformada por la tubería de presión, sus accesorios y un sistema de sujeción y suspensión.

La tubería de presión debe ser preferiblemente recta, aunque en algunas ocasiones es difícil de obtener, debido a las condiciones del terreno. Este hecho obliga a ajustarse al perfil topográfico de su trazado, con el apoyo de estructuras de concreto que le ayudan a sostenerse (apoyos) y a variar la pendiente (anclajes). En la hidroeléctrica de Zunil es una tubería recta que

cuenta con sus apoyos para garantizar el correcto anclaje de la tubería de presión como lo ilustra la figura 16.

Figura 16. **Tubería de presión**



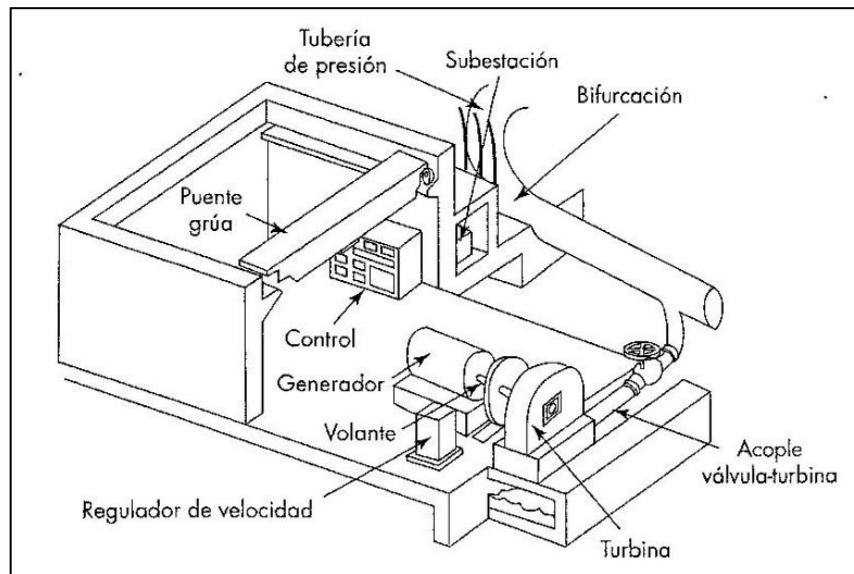
Fuente: Hidroeléctrica de Zunil.

4.6. Casa de máquinas

La casa de máquinas es una estructura civil que tiene la mayor parte del equipo electromecánico, donde se transforma la energía hidráulica del agua en energía mecánica y posteriormente en eléctrica. Por ello, su ubicación es muy importante para el buen funcionamiento de la central.

Una ilustración de la casa de máquinas se puede observar en la figura 17.

Figura 17. **Casa de máquinas vista en perspectiva**



Fuente: FLOREZ ORTIZ, Ramiro. Pequeñas centrales hidroeléctricas. p. 273.

4.6.1. Elementos de la casa de máquinas

En la casa de máquinas se encuentra el equipo hidráulico, equipo eléctrico, panel de control, la herramienta y maquinaria necesaria para el montaje y mantenimiento de los diferentes elementos que la conforman.

4.6.1.1. Válvula

Éste es un elemento que se encuentra ubicado entre la tubería de presión y la turbina, permitiendo el paso o el cierre total del flujo del caudal; no se usa para regular caudal. La válvula de compuerta en la hidroeléctrica se ilustra en la figura 18. Juntamente con esta válvula se compuerta grande en la parte inferior

de la tubería de presión se coloca también una pequeña válvula de *bypass* para conectar el lado de alta presión y el de baja presión.

Figura 18. **Válvula de compuerta**



Fuente: Hidroeléctrica de Zunil.

4.6.1.2. Turbina

La turbina realiza la transformación de la energía hidráulica en energía mecánica. Debido a la variación en la demanda de energía eléctrica, la potencia en el eje de la turbina también debe variar, de forma que se mantenga la frecuencia constante; para ello, la turbina dispone de un regulador de velocidad que permite ajustar el caudal a la demanda de energía eléctrica.

4.6.2. Caracterización del equipo existente en hidroeléctrica Zunil

Turbina tipo Francis, Marca JM VOITH.

4.6.2.1. Ficha técnica de la turbina

Los datos técnicos de la turbina que se encuentra en la Planta Zunil II, Zunil, Quetzaltenango Guatemala Centro América, se indican en la tabla I.

Tabla I. **Características de la turbina**

Unidad	Datos Placa:	Operación:
Tipo	Francis	
No. De Serie (Placa)	15 388	
Fabricante	JM VOITH	
Año de Fabricación	1 953	
Velocidad (rpm)		600
Potencia		1 250 kW
Tipo de Eje	Horizontal	Horizontal

Fuente: Hidroeléctrica Zunil.

Tubería:

- Longitud = 264,50 m.
- Altura = 28,50 m.
- Diámetro de tubería = 1,41 m. y el Caudal (Q) = 2,2 m³/seg.

4.6.2.2. Ficha técnica del generador

Es el encargado de la transformación de energía mecánica en energía eléctrica. Está acoplado mecánicamente al eje de la turbina por acople directo.

Los datos técnicos del generador se muestran en la tabla II.

Tabla II. Datos técnicos del generador

Unidad	No. 1	Valores de Operación
No. De Serie (Placa)	594 764	
Fabricante	ELIN	
Año de Fabricación		1 946
Velocidad (rpm)		600
Capacidad (kVA)		1 250 KVA
COSy	0,8	
Voltaje		2 400
Número de Fases		3
Temperatura de Diseño	40°C	
Tipo de Enfriamiento	Auto refrigeración	
Protecciones	Eléctricas	

Fuente: Hidroeléctrica de Zunil.

4.6.2.3. Volante de inercia

El volante se encarga de compensar el momento de inercia del grupo turbina-generator, para atenuar el efecto del golpe de ariete en la tubería de presión y el hidrograma.

4.6.2.4. Subestación

En la subestación se encuentran equipos que permiten la conexión de la hidroeléctrica a la red de transmisión. Ella se encarga de elevar la tensión de generación, hasta una tensión de transmisión de acuerdo con la potencia de generación y longitud de onda.

Para su funcionamiento la subestación requiere como mínimo los siguientes equipos: interruptor de generación, transformador de potencia, interruptor de transmisión, accesorios de seguridad (seccionadores, puestas a tierra, entre otros), equipos de medida y protecciones.

4.6.2.5. Puente grúa

Para facilitar el montaje y reparación de la turbina y el generador se requiere un puente grúa que facilite dicha operación. Éste se encarga del montaje y desmontaje de la turbina y del generador dentro de la casa de máquinas.

5. PROCEDIMIENTO DE DESARMADO

5.1. Identificación de los diferentes componentes que integran la turbina

- Rodete
- Gobernador o distribuidor Fink
- Espaciadores y tapaderas
- Chumaceras
- Eje central
- Tubo de aspiración

5.2. Desarmado total de turbina

- Desmontaje de la tapadera en tubo de aspiración
- Retirar tubo de aspiración
- Desmontaje de sello mecánico y sistema de enfriamiento
- Desmontaje de cubiertas y media luna de bronce

- Extracción de sello tipo estopa grafitada de 1,27 centímetros en el eje central.
- Desmontaje de chumacera (parte superior de chumacera) retirando 2 piezas de aluminio.
- Extracción de cuñas
- Extracción de tornillo en el rodete
- Extracción de rodete del eje central
- Desmontaje del gobernador o distribuidor Fink.
- Extracción de tapadera que alinea las paletas y tapadera de rodete
- Desmontaje de gobernador o distribuidor Fink (paletas o álabes directrices, bielas y anclajes).
- Extracción de chumaceras en eje central
- Desmontaje de eje central
- Desmontaje de volante
- Desmontaje de espaciador principal de gobernador o distribuidor Fink

6. DIAGNÓSTICO Y REACONDICIONAMIENTO DE LA TURBINA FRANCIS

6.1. Evaluación del rodete

Desgaste en la pista de ajuste con los espaciadores los cuales presentan una alta remoción de material al igual que golpes y desgaste en los alabes. Se encontró también daños en la pista de las cuñas, tales daños se muestran en la figura 19.

Figura 19. Rodete

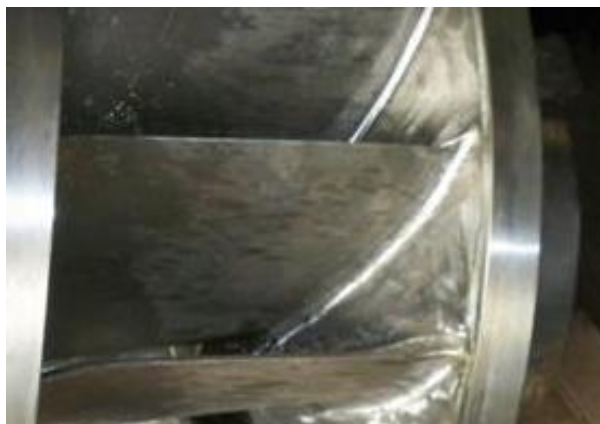


Fuente: Hidroeléctrica Zunil.

6.2. Reacondicionamiento del rodete

Metalizado y rectificado de los alabes y sus vértices, que se muestra en la figura 20.

Figura 20. **Reparación de alabes**



Fuente: Hidroeléctrica Zunil

Metalizado, refrentado y cilindrado en pista de ajuste con los espaciadores, como se ilustra en la figura 21.

Figura 21. **Pista de ajuste**



Fuente: Hidroeléctrica Zunil.

Balance dinámico de rodete y eje, como se ilustra en la figura 22.

Figura 22. **Rodete y eje**



Fuente: Hidroeléctrica Zunil.

6.3. Evaluación del gobernador o distribuidor Fink

Daño excesivo en el área de contacto entre paletas, causando pérdidas de agua por su alto desajuste. Desgaste en los ejes de las paletas o álabes directrices con mucho juego axial. Dichos daños se muestran en la figura 23.

Figura 23. Paletas del gobernador



Fuente: Hidroeléctrica Zunil.

Desgaste y deformación cilíndrica en los soportes guía de las paletas o álabes directrices, bujes de bielas y manivelas, que se muestran a continuación en la figura 24.

Figura 24. **Soportes, bielas y manivelas del gobernador**



Fuente: Hidroeléctrica Zunil.

6.4. **Reacondicionamiento del gobernador**

Metalizado y rectificado en área de contacto entre paletas o álabes directrices, dicho trabajo se llevó a cabo luego de aportar material a través de la soldadura y su rectificado en el torno y la fresadora, como se muestra en la figura 25.

Figura 25. **Reparación de paletas del gobernador**



Fuente: Hidroeléctrica Zunil.

Aporte de material en el área desgastada del eje, para luego ser rectificada en el torno, se ilustra en la siguiente figura 26.

Figura 26. **Reparación de paletas o álabes directrices**



Fuente: Hidroeléctrica Zunil.

El reacondicionamiento final del juego de paletas se ilustra en la figura 27.

Figura 27. **Paletas o alabes directrices reacondicionados**



Fuente: Hidroeléctrica Zunil.

Rectificado de diámetro interno en los soportes guía de las paletas y fabricación de bujes para lograr el correcto ajuste y su libre movimiento. Dicho trabajo se ilustra en la figura 28.

Figura 28. **Reacondicionamiento de soportes de álabes directrices**



Fuente: Hidroeléctrica Zunil.

6.5. Evaluación de espaciadores y tapaderas

Presencia de corrosión y desgaste por abrasión en espaciadores y tapaderas, la cual genera una considerable baja en la eficiencia por fugas de agua entre los espaciadores, tapaderas y rodete, el estado de dichos elementos se ilustra a continuación en la figura 29. Los espaciadores y tapaderas se encuentran en pésimas condiciones por lo que se descarta la reparación de dichas piezas y se considera su fabricación total.

Figura 29. **Espaciadores y tapaderas**



Fuente: Hidroeléctrica Zunil.

6.6. **Reacondicionamiento de espaciadores y tapaderas**

Fabricación de espaciadores, tapaderas y bujes, estos elementos se ilustran en la figura 30.

Figura 30. **Reacondicionamiento de tapaderas y sus bujes**



Fuente: Hidroeléctrica Zunil.

6.7. Evaluación de chumaceras

Chumaceras radiales y axiales fundidas debido a la alta temperatura generada en su operación. También presenta ralladuras en la pista de deslizamiento debido a la mala lubricación y un deficiente sistema de enfriamiento, lo cual se ilustra en la figura 31. La concepción de la línea del eje, la disposición de las chumaceras y de los soportes, debe permitir, por una parte en régimen permanente una rotación sin vibración excesiva, la cual depende mucho del juego en las chumaceras. Dichas chumaceras presenta excesivo juego.

Figura 31. **Chumaceras**

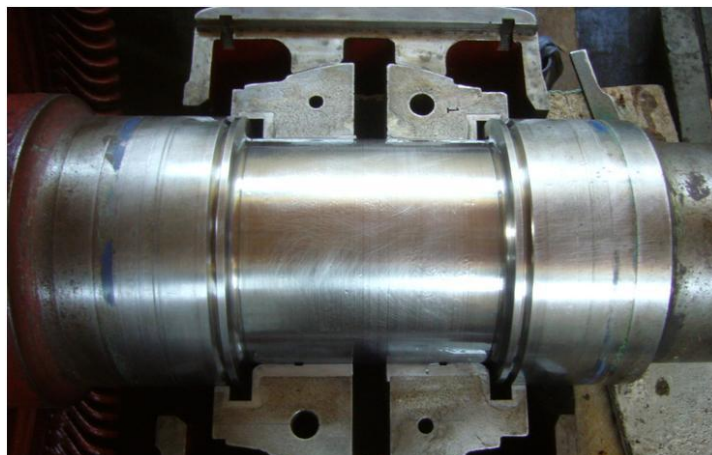


Fuente: Hidroeléctrica Zunil.

6.8. Reacondicionamiento de chumaceras

Se reemplazó la capa superficial de Babbitt y se rectificaron para dar las medidas necesarias para garantizar una correcta lubricación. Estos trabajos se ilustran en la figura 32.

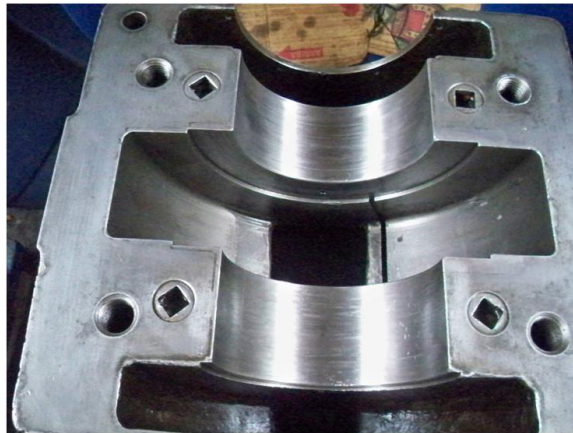
Figura 32. **Reacondicionamiento de chumaceras**



Fuente: Hidroeléctrica Zunil.

Limpeza de ductos en el sistema de enfriamiento de las chumaceras, se muestra en la figura 33.

Figura 33. **Limpeza sistema de enfriamiento**



Fuente: Hidroeléctrica Zunil.

6.9. Evaluación de eje central

Se encontraron golpes y ralladuras en superficie de chumaceras y área de las cuñas. Estos daños se muestran en la figura 34.

Figura 34. **Eje central**



Fuente: Hidroeléctrica Zunil.

6.10. Reacondicionamiento de eje central

Rectificación y pulido en área de chumaceras y pista de rodete, dicho trabajo se ilustra en la figura 35.

Figura 35. **Reacondicionamiento de eje central**



Fuente: Hidroeléctrica Zunil.

6.11. Evaluación de tubo de desfogue

Presenta desgaste y remoción de material generado por el constante choque del agua en área crítica, generando debilidad en la pieza completa, este deterioro se muestra en la figura 36.

Figura 36. **Tubo de desfogue**



Fuente: Hidroeléctrica Zunil.

6.12. Reacondicionamiento de tubo de desfogue

Remoción de masilla plástica utilizada como recubrimiento para retardar los desgastes en las paredes internas del tubo, la limpieza final se realizó con la ayuda de aire comprimido y arena en suspensión. Luego se aplicó base para recubrimiento de un nuevo epóxico para finalizar aplicándolo con un espesor de 3/16 de pulgada. Dicho epóxico ofrece una resistencia al desgaste y provee una capa de material de sacrificio que debe ser reforzada con una frecuencia adecuada y evitar el desgaste definitivo del tubo de desfogue. Este trabajo de reacondicionamiento se muestra en la figura 37.

Figura 37. **Reacondicionamiento de tubo de desfogue**



Fuente: Hidroeléctrica Zunil.

6.13. **Resultado final del reacondicionamiento en términos de eficiencia**

El reacondicionamiento de la turbina tipo Francis en la hidroeléctrica de Zunil al final de los trabajos de mantenimiento dio como resultado un aumento en la eficiencia logrando una mayor generación de energía y un aprovechamiento de esta energía renovable. La comparación del antes y después del reacondicionamiento en la turbina en términos de eficiencia se presenta en la tabla III.

Tabla III. **Resultado final del reacondicionamiento en términos de energía generada**

	Generación kW
Antes de reacondicionamiento	450
Después de reacondicionamiento	820

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. La documentación de los trabajos de mantenimiento aplicados a la turbina Francis de la hidroeléctrica de Zunil pasa a formar parte del historial y a ser una fuente de información para las futuras actividades de mantenimiento y lograr la generación eléctrica esperada para este equipo.
2. Se ha logrado documentar las diferentes actividades realizadas al equipo de manera explícita y proveer de un material de referencia para poder realizar un mantenimiento a la turbina, considerando que no cuenta con los manuales del fabricante y por lo tanto se puede tomar como base para realizar el mantenimiento preventivo.
3. Se explica cómo opera la hidroeléctrica de Zunil desde la captación del agua hasta la salida por el tubo de desfogue en la turbina Francis.
4. Los diferentes elementos considerados como críticos en los cuales se ve afectada directamente la eficiencia y por tanto la generación de energía en la hidroeléctrica, se documentó todo lo referente a dichos elementos, su estado inicial y final luego del reacondicionamiento.
5. Se logró un incremento superior al 40% en generación de energía en comparación a lo generado previo a realizar todas las actividades de mantenimiento.

RECOMENDACIONES

1. Establecer un plan de mantenimiento preventivo que proporcione el soporte necesario para mantener la eficiencia alcanzada luego de los trabajos de reacondicionamiento.
2. Incluir actividades de mantenimiento predictivas, es decir análisis de vibraciones, análisis de aceites entre otros para monitorear y prevenir daños irreversibles de alguno de los elementos que componen el equipo hidráulico.
3. Disponer de un lugar seguro y de acceso rápido para resguardar y archivar todas las actividades realizadas a la turbina con lo cual se genere un historial y una base para las actividades futuras a realizar evaluando los intervalos de tiempo entre una actividad y otra.
4. Renovar algunos de los equipos de metrología para tener un mejor control y monitoreo de la operación y desempeño del equipo hidráulico y eléctrico.
5. Capacitar al personal en tema de mantenimiento, indicando las rutinas de mantenimiento diarias, semanales, mensuales y las actividades que se requieran para el monitoreo y conservación de los equipos.

6. Establecer como parte del soporte integral en el tema de mantenimiento a la hidroeléctrica las actividades preventivas y de limpieza en el área del pretratamiento del agua con el objetivo de garantizar un adecuado tratamiento y abastecimiento de agua a la turbina hidráulica.

BIBLIOGRAFÍA

1. BARRIOS ORTEGA, Víctor Hugo. *Generalidades sobre minihidroeléctricas, elementos a considerar en la energética futura de Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 1985. 156 p.
2. ELLIOTT CAPELLA, Yolanda. *Análisis de causa raíz con 8D*. Costa Rica: PXS, 2011. 84 p.
3. ENCINAS, Manuel Polo. *Turbomáquinas hidráulicas: principios fundamentales*. 3a ed. México: Limusa, 1983. 295 p.
4. FLÓREZ ORTIZ, Ramiro. *Pequeñas centrales hidroeléctricas*. Colombia: Nomos, 2001. 357 p.
5. MATAIX, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. 2a ed. México: Ediciones del Castillo, 1982. 660 p.
6. PACHECO GRAMAJO, Romeo Alfonso. *Estudio y análisis para la optimización de la planta hidroeléctrica de Zunil*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 2009. 71 p.

7. RAMÍREZ VÁSQUEZ, José. *Máquinas motrices generadoras de energía eléctrica*. 8a ed. España: Grupo Editorial Ceac, 1996. 827 p.
8. REYES AGUIRRE, Miguel. *Curso de máquinas hidráulica*. 11a ed. México: Representaciones y servicios de ingeniería, 1988. 231 p.
9. RODRIGUEZ PAZOS, Carlos Eduardo. *Mantenimiento de una turbina hidráulica tipo Francis de eje vertical*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 1989. 153 p.
10. RUSSELL, George E. *Hidráulica*. 10a ed. México: Continental, 1982. 554 p.
11. SANTO POTESSE, E. *Centrales eléctricas*. España: Gustavo Gili, 619 p.
12. Viejo Zubicaray, Manuel. *Energía hidroeléctrica, turbinas y plantas generadoras*. México: Limusa, 1977. 330 p.