



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA MEJORA EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE  
UNA TURBINA HIDRÁULICA TIPO PELTON DESPUÉS DE UN PROCESO DE  
REACONDICIONAMIENTO DEL RODETE**

**Francis Roberto Gándara Sandoval**

Asesorado por la Msc. Inga. Ismelda Isabel López Tohom

Guatemala, marzo de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA MEJORA EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE  
UNA TURBINA HIDRÁULICA TIPO PELTON DESPUÉS DE UN PROCESO DE  
REACONDICIONAMIENTO DEL RODETE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**FRANCIS ROBERTO GÁNDARA SANDOVAL**

ASESORADO POR LA MSC. INGA. ISMELDA ISABEL LÓPEZ TOHOM

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL**

GUATEMALA, MARZO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

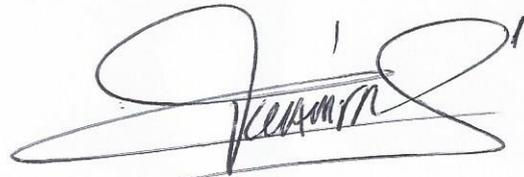
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. César Augusto Akú Castillo
EXAMINADOR	Ing. Alberto Eulalio Hernández García
EXAMINADOR	Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## 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:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA MEJORA EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE  
UNA TURBINA HIDRÁULICA TIPO PELTON DESPUÉS DE UN PROCESO DE  
REACONDICIONAMIENTO DEL RODETE**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 12 de enero de 2019.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Francis Roberto Gándara Sandoval', written over a horizontal line.

**Francis Roberto Gándara Sandoval**

Guatemala, 12 de enero de 2019.

Director  
Juan José Peralta Dardón  
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial  
Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del (la) estudiante **Francis Roberto Gándara Sandoval** carné número **999000299**, quien optó la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en Energía y Ambiente.

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular, atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Inga. Isabel López Tohom  
Col. 5543

MSc. Inga. Ismelda Isabel López Tohom  
Asesor (a)

MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes M.  
Coordinador de Área  
Desarrollo Socio-Ambiental y Energético

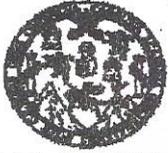


M.A. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotti  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería



Cc archivo/LZLA.

**RESOLUCIÓN DE JUNTA DIRECTIVA:** Proceso de Graduación aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011.



REF.DIR.EMI.056.019

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el Visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística del trabajo de graduación en la modalidad Estudios de Postgrado titulado **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA MEJORA EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA TURBINA HIDRÁULICA TIPO PELTON DESPUÉS DE UN PROCESO DE REACONDICIONAMIENTO DEL RODETE**, presentado por el estudiante universitario **Francis Roberto Gándara Sandoval**, aprueba el presente trabajo y solicita la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAR A TODOS”

Ing. Cesar Ernesto Urquiza Rodas  
DIRECTOR a.i.  
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial



Guatemala, marzo de 2019.

/mgp

Universidad de San Carlos  
De Guatemala

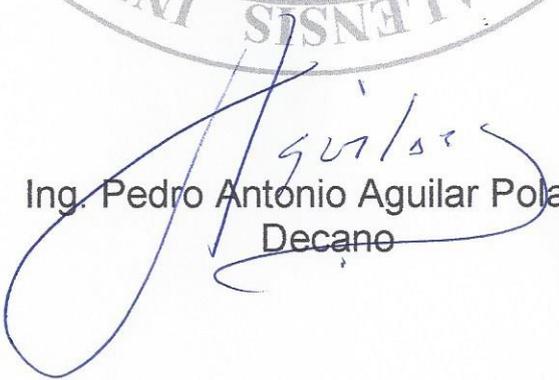


Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG.159.2019

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 Industrial del trabajo de graduación titulado: **“DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA MEJORA EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA TURBINA HIDRÁULICA TIPO PELTON DESPUÉS DE UN PROCESO DE REACONDICIONAMIENTO DEL RODETE”** presentado por el estudiante universitario: **Francis Roberto Gándara Sandoval** después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano



Guatemala, Marzo de 2019

/echm

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por haberme permitido realizar una más de mis metas.
- Mis padres** Por haberme traído al mundo y guiado a través de él, mi eterno agradecimiento por su apoyo para hacer realidad este sueño.
- Mis hermanos** Jose y Ana Cristina Gándara Sandoval, por su apoyo y compañía durante mi vida.
- Mis abuelos** Carlos Enrique, Irma Violeta, Luis Roberto (q. d. e. p.) y Margarita Aida, por sus sabias enseñanzas y consejos durante toda mi vida.
- Familia y amigos**

## AGRADECIMIENTOS A:

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser la <i>alma mater</i> que me permitió nutrirme de conocimientos.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por proporcionarme los conocimientos que me han permitido realizar este trabajo de graduación.
<b>Hidroeléctrica El Recreo</b>	Por haberme brindado la información necesaria para realizar este diseño de investigación.
<b>Mis amigos</b>	Por haberme acompañado durante la carrera.
<b>Mi asesor</b>	Msc. Ing. Ismelda Isabel López Tohom, por haberme guiado durante el trabajo de graduación.
<b>Gerente de Planta Hidroeléctrica El Recreo</b>	Ing. Otto López Nimatuj quien bondadosamente me ayudó a lo largo de la investigación.
<b>Familia y amigos en general</b>	

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES .....	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	7
4. JUSTIFICACIÓN .....	11
5. OBJETIVOS .....	13
5.1. General.....	13
5.2. Específicos .....	13
6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	15
7. MARCO TEÓRICO.....	17
7.1. Centrales hidroeléctricas .....	17
7.1.1. Aspectos generales .....	17
7.1.2. Funcionamiento .....	18
7.1.3. Clasificación.....	19
7.1.4. Centrales hidroeléctricas en Guatemala.....	21

7.2.	Turbinas hidráulicas .....	22
7.2.1.	Tipos de turbinas según su rodete .....	22
7.2.1.1.	Turbinas Francis.....	22
7.2.1.2.	Turbinas Kaplan .....	25
7.2.1.3.	Turbinas Pelton .....	26
7.2.2.	Elementos de las turbinas hidráulicas tipo Pelton ...	28
7.2.2.1.	Tubería de presión .....	28
7.2.2.2.	Rodete.....	29
7.3.	Rodetes Pelton.....	29
7.3.1.	Definición.....	29
7.3.2.	Problemas en el rodete .....	30
7.3.2.1.	Erosión .....	30
7.3.2.2.	Cavitación.....	31
7.3.3.	Mantenimiento de un rodete.....	33
7.3.4.	Reacondicionamiento de un rodete.....	34
7.3.4.1.	Ensayos no destructivos.....	34
7.3.4.1.1.	Partículas magnéticas...	35
7.3.4.1.2.	Ultrasonido .....	35
7.3.4.1.3.	Líquidos penetrantes.....	35
7.3.4.1.4.	Comparación de peso ...	35
7.3.4.1.5.	Mediciones y cartografía .....	36
7.3.4.2.	Preparación de la superficie .....	36
7.3.4.3.	Proceso de aporte .....	37
7.3.4.3.1.	Pre calentamiento del rodete.....	37
7.3.4.3.2.	Soldadura MAG/MIG .....	38
7.3.4.3.3.	Soldadura por arco eléctrico manual con	

	electrodo metálico revestido.....	40
7.3.4.4.	Trazado .....	40
7.3.4.5.	Desbaste y pulido .....	41
7.3.4.6.	Acabado final .....	42
7.3.4.7.	Verificación del aporte .....	42
7.3.4.8.	Balanceo dinámico .....	43
7.3.4.9.	Tratamiento térmico.....	43
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	45
9.	METODOLOGÍA.....	49
9.1.	Tipo de estudio .....	49
9.2.	Fases del estudio .....	49
9.2.1.	Fase 1: exploración bibliográfica .....	49
9.2.2.	Fase 2: recolección de datos .....	50
9.2.2.1.	Idealizaciones necesarias para la construcción de un modelo manejable .....	50
9.2.2.2.	Determinación del potencial energético en el recurso hídrico.....	50
9.2.2.3.	Determinación de la producción de energía de una turbina hidráulica tipo Pelton con rodete nuevo, desgastado y reacondicionado .....	52
9.2.2.4.	Determinación de los costos de reacondicionamiento de un rodete desgastado versus la compra de un rodete nuevo al fabricante .....	53

	9.2.2.5.	Determinación del desgaste del rodete en función de las horas de operación.....	54
	9.2.2.6.	Manual de mantenimiento .....	56
9.3.		Fase 3: análisis de datos.....	56
	9.3.1.1.	Correlación de la producción de energía de una turbina hidráulica tipo Pelton con rodete nuevo, desgastado y reacondicionado y las horas de operación.....	56
	9.3.1.2.	Análisis del desgaste del rodete en función de las horas de operación.....	57
	9.3.2.	Fase 4: análisis financiero .....	57
	9.3.2.1.	Comparación de los costos de reacondicionamiento de un rodete desgastado versus la compra de un rodete nuevo al fabricante y análisis financiero.....	57
	9.3.2.2.	Herramientas de análisis financiero .....	58
10.		TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN .....	59
11.		CRONOGRAMA .....	61
12.		FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO .....	63
13.		BIBLIOGRAFÍA .....	65

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Turbina hidráulica tipo Francis .....	24
2.	Turbina hidráulica tipo Kaplan.....	26
3.	Turbina hidráulica Pelton.....	28
4.	Rodete Nuevo vrs. Rodete erosionado por cavitación .....	32
5.	Detección de poros .....	37
6.	Aporte por medio de soldadura MAG .....	39
7.	Rotolimadora de eje flexible .....	42
8.	Puntos de toma de medidas en canjilones.....	55
9.	Tasa interna de retorno .....	58

### TABLAS

I.	Producción de energía de una turbina hidráulica con rodetes en distinta condición.....	52
II.	Costo del reacondicionamiento del rodete .....	53
III.	Costo de la compra e importación de un rodete nuevo .....	54
IV.	Recursos necesarios para la investigación .....	63



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>H</b>	Altura
<b>\$</b>	Dólar estadounidense
<b>E</b>	Este
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>°C/h</b>	Grados Celsius por hora
<b>°</b>	Grados
<b>Hz</b>	Hercio
<b>h</b>	Horas
<b>=</b>	Igual que
<b>KW</b>	Kilovatio
<b>Km</b>	Kilómetro
<b>KV</b>	Kilovoltio
<b>&gt;</b>	Mayor que
<b>MW</b>	Mega Vatio
<b>MWh</b>	Mega vatio hora
<b>&lt;</b>	Menor que
<b>m</b>	Metro
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cúbico
<b>m<sup>3</sup>/s</b>	Metro cúbico por segundo
<b>m.s.n.m.</b>	Metros sobre el nivel del mar
<b>'</b>	Pies o minutos
<b>mm</b>	Milímetro
<b>Mo</b>	Molibdeno

<b>Ni</b>	Níquel
<b>N</b>	Norte
<b>O</b>	Oeste
<b>%</b>	Porcentaje
<b>P</b>	Potencia
<b>“</b>	Pulgadas o segundos
<b>Q</b>	Quetzales
<b>RPM</b>	Revoluciones por minuto
<b>S</b>	Sur
<b>Ns</b>	Velocidad angular o velocidad específica
<b>W</b>	Vatio

## GLOSARIO

<b>AMM</b>	Administrador del Mercado Mayorista.
<b>Aporte</b>	Se refiere a la transferencia de material del electrodo al rodete por medio de la soldadura.
<b>AWS</b>	Asociación Americana de Soldadura.
<b>Axial</b>	En dirección al eje.
<b>Caída</b>	Diferencial de altura entre el embalse y el punto donde está la turbina.
<b>Cangilón</b>	Álabes o paletas unidos al rodete.
<b>Casa de máquinas</b>	Infraestructura en donde se encuentra la o las turbinas de una central hidroeléctrica.
<b>Cota</b>	Número que indica la altura de un punto sobre el nivel del mar.
<b>Desfogue</b>	Cota más baja de un complejo hidroeléctrico, punto en donde se regresa el agua al cauce del río.
<b>Embalse</b>	Acumulación de agua debido a una presa.

<b>Energía cinética</b>	Energía debida a un movimiento determinado.
<b>Energía potencial</b>	Energía que contiene el agua debido a la altura y es aprovechable para generar electricidad a partir de la misma.
<b>FIE</b>	Fecha de inicio de exploración, autorización emitida por el Ministerio de Energía y Minas para autorizar la exploración o construcción de una Hidroeléctrica.
<b>GLP</b>	Gas Licuado de Petróleo, Propano.
<b>GRP</b>	Glass-reinforced plastic (Material plástico reforzado con fibras de vidrio)
<b>IEMA</b>	Impuesto a las Empresas Mercantiles y Agropecuarias.
<b>IVA</b>	Impuesto al valor agregado.
<b>INDE</b>	Instituto Nacional de Electrificación.
<b>Inyector</b>	Dispositivo que abre, cierra y direcciona el flujo de agua hacia los cangilones.
<b>MAG</b>	Metal Active Gas, soldadura de electrodo continuo que usa un gas activo en su proceso.

<b>MIG</b>	Metal Inert Gas, soldadura de electrodo continuo que usa un gas inerte en su proceso.
<b>PLC</b>	Controlador Lógico Programable.
<b>Presa</b>	Obstáculo que tiene como objetivo elevar el nivel del agua a una cota específica.
<b>Recurso hídrico</b>	Agua.
<b>Rodete</b>	Elemento rotativo dentro de una turbina hidráulica.
<b>SNI</b>	Sistema Nacional Interconectado.
<b>SAT</b>	Superintendencia de Administración Tributaria.
<b>Spot</b>	Costo del MWh en Guatemala.
<b>Tensión</b>	Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, medida en Voltios.
<b>Transformador</b>	Dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico.
<b>Turbina hidráulica</b>	Aprovecha la energía de un fluido y la convierte en energía mecánica rotativa.
<b>UTM</b>	Sistema de coordenadas universal transversal de Mercator

**ZAT**

Zona afectada térmicamente.

**Vatio**

Unidad de medida de potencia

## RESUMEN

El reacondicionamiento del rodete de turbinas hidráulicas tipo Pelton es un procedimiento que ya se utiliza en algunas centrales hidroeléctricas en Guatemala, dicho procedimiento es un mantenimiento al rotor de la turbina el cual se ve desgastado por erosión, cavitación y sólidos suspendidos en el agua que alimenta a la turbina. El mantenimiento consta en devolverle las dimensiones de fábrica al elemento rotativo (rodete) mediante el aporte de material por medio de soldadura.

Ampliamente se sabe que la eficiencia de las máquinas turbomotoras aumenta luego de este procedimiento, sin embargo, no existen pruebas fehacientes que hayan medido este cambio de eficiencia de producción.

El presente diseño de investigación busca sentar las bases para calcular este cambio de eficiencia mediante la obtención de datos de producción de turbinas hidráulicas con rodetes nuevos, desgastados, y reacondicionados. Contando con estos datos se realizará un análisis técnico y financiero para concluir la viabilidad del mismo, así como también buscará deducir matemáticamente el aumento en la eficiencia energética de las turbinas hidráulicas.



# 1. INTRODUCCIÓN

La eficiencia de la producción energética de una turbina hidráulica tipo Pelton se ve afectada por el desgaste del rodete. Al estar desgastado, se modifican las características de transferencia energética entre el recurso hídrico y el rodete, lo cual genera una reducción considerable de la eficiencia energética de la turbina. Esto repercute en mayores costos de operación asociados a mantenimiento y, por lo tanto, también paros de producción por mantenimiento más seguidos.

Se propone por medio de esta investigación calcular la mejora en la eficiencia que resulta de reacondicionar el elemento rotativo por medio del aporte de material metálico para restaurar las dimensiones originales del rodete. En el ámbito hidroeléctrico, el reacondicionamiento del rodete es una práctica ya utilizada en Guatemala, sin embargo, no existen literaturas al respecto, por lo que la presente investigación es original y sentará un precedente para las hidroeléctricas, pues aportará la información necesaria para realizar el procedimiento de mantenimiento del rodete y validará su viabilidad económica.

Con la solución propuesta se espera que exista una mejora significativa en la eficiencia de producción energética de una turbina hidráulica tipo Pelton, luego de practicarle al rodete un procedimiento de reacondicionamiento. Lo anterior ayudará a que las plantas de generación hidroeléctrica que operen con equipamiento tipo Pelton migren a este tipo de mantenimiento al rodete, lo que desembocará en plantas de generación hidroeléctrica más eficientes en cuanto a costos de mantenimiento, operación y mejores eficiencias energéticas. Si se

genera más eficientemente en cuanto a recursos, se estará intercambiando energías no renovables por energías renovables eficientes.

Para probar el punto de la tesis se realizarán una serie de toma de datos de turbinas con rodetes en distintos estados (nuevos, usados y reacondicionados), con esta matriz se contará con información para deducir si el proceso de reacondicionamiento aumenta la eficiencia de producción energética de una turbina hidráulica tipo Pelton. También se realizará toma de datos del desgaste de los canchilones y se capturará la producción de energía de la turbina con el rodete, mediante esta información se realizará un análisis de correlación para determinar si el desgaste influye negativamente en la eficiencia de producción energética de una máquina turbomotora. Para finalizar se realizará un análisis técnico y financiero para determinar la factibilidad del procedimiento.

La investigación se dividirá en 5 capítulos. En el primer capítulo se hará una revisión de la literatura donde se definirá una base teórica para que el lector comprenda todos los detalles de la investigación. En el segundo capítulo se recopilará la información necesaria para realizar los análisis mediante los cuales se determinará si existe o no una mejora en la eficiencia de producción energética de una turbina hidráulica Pelton, luego de realizar un reacondicionamiento al rodete y si existe en qué medida.

En el tercer capítulo se presentarán y analizarán los resultados obtenidos en el capítulo anterior a manera de concluir si se mejora la eficiencia de la turbina, y en el cuarto capítulo se realizará el análisis de costos para comprobar la viabilidad del procedimiento y si este es rentable para una empresa por medio del análisis del valor actual neto y la tasa interna de retorno.

## 2. ANTECEDENTES

En la actualidad existen trabajos de investigación que se basan en turbinas hidráulicas, los cuales ayudarán como soporte para la presente investigación. A continuación se mencionan algunos que aportan información importante:

En la tesis *Reacondicionamiento de turbina Francis de Hidroeléctrica Zunil, Municipalidad de Quetzaltenango* (Chávez, 2013) se documentó el procedimiento para realizar el reacondicionamiento del elemento rotativo de una máquina hidráulica. Básicamente el funcionamiento de una turbina hidráulica es el mismo en principio, cambian cuestiones de diseño peculiares, sin embargo, este trabajo de investigación representa un precedente importante para la presente investigación. A lo largo del trabajo se enumeran los pasos para realizar correctamente el mantenimiento de un rodete hidráulico, estos pasos son muy similares a los que se deberán realizar para el mantenimiento del rodete de una turbina tipo Pelton, por lo cual representan un antecedente válido para el presente trabajo de investigación.

Lo más relevante para la presente investigación del trabajo titulado *Reacondicionamiento de turbina Francis de Hidroeléctrica Zunil, Municipalidad de Quetzaltenango* (Chávez, 2013) es lo desarrollado en el último apartado de la tesis, el cual habla sobre la mejora en la eficiencia productiva de la turbina hidráulica tipo Francis, “evidencia que existen diferencias de hasta un 40 % en la generación debido al reacondicionamiento del elemento rotativo (rodete)” (Chávez, 2013). Este apartado sustenta la presente investigación y se estudiará a fondo para determinar si el análisis utilizado puede usarse también en

turbinas tipo Pelton. Es importante mencionar que este trabajo de investigación fue realizado en Guatemala.

Otro importante hallazgo es el trabajo de tesis titulado *Reacondicionamiento de los alabes directrices de una turbina hidráulica tipo Francis en Hidroeléctrica Los Esclavos y su análisis de costos* (Rivera Guirola, 2009), mediante el cual se hace un análisis de costos del proceso de reacondicionamiento y una comparación entre dicho proceso y la compra de los componentes al fabricante. Esta fuente servirá como base para el análisis económico del proceso de reacondicionamiento de una turbina hidráulica tipo Pelton en esta investigación. Es importante resaltar que mediante el procedimiento de reacondicionamiento versus la compra de componentes nuevos al fabricante se ahorran \$ 150,840.00, representando un ahorro de 617 %.

Los trabajos de investigación mencionados en los últimos párrafos dan los cánones generales del proceso de reacondicionamiento de una turbina Francis y su análisis económico, sin embargo, se encontró una tesis que aplica dicho procedimiento en turbinas Pelton: *Implementación de un procedimiento de inspección y reparación por soldadura de rodetes Pelton en la Central el Molino del Proyecto Hidroeléctrico Paute* (Oyervide Ojeda & Hurtado, 2004). En dicha investigación se resalta la importancia del mantenimiento al rodete o rueda. Se encontró una propuesta de reparación de rodetes por medio del aporte de material metálico a manera de restablecer las dimensiones del rodete. “El procedimiento aquí recomendado ha sido realizado con base en una exhaustiva investigación que permite no solamente presentar un método de inspección y reparación por soldadura de rodetes Pelton, sino además brinda la oportunidad de ampliar conocimientos respecto a las nuevas tendencias de reparación de rodetes” (Oyervide Ojeda & Hurtado, 2004).

A lo largo de la investigación se ahonda en temas de interés para el presente trabajo, en el documento “se analizan las causas de la erosión en los rodetes y se recomiendan técnicas para el control de rodetes que se encuentren en servicio con el fin de dar una solución de reparación” (Oyervide Ojeda & Hurtado, 2004). También se aborda el tema de los tipos de reparación por soldadura para una rueda Pelton, se hace una interesante “comparación entre los procesos de soldadura más comunes para elegir el más conveniente a aplicarse en cada caso particular” (Oyervide Ojeda & Hurtado, 2004). En el capítulo cuarto se estudian aspectos que “permiten evaluar la factibilidad técnica, económica y financiera del proceso de reparación y presentan un programa que da como resultado el costo total de una reparación de este tipo” (Oyervide Ojeda & Hurtado, 2004).

En el compendio de información *Turbinas Pelton* (Marchegiani, 2004) se explica el funcionamiento de una turbina hidráulica tipo Pelton y las peculiaridades del mismo, lo importante de este compendio es que da a conocer los fundamentos teóricos del diseño de los rodetes y sus canchilones. En el mismo se abordan temas de mucho interés para esta investigación como: aplicación de la fórmula de Bernoulli a las presiones de entrada y salida para determinar la energía disponible en el fluido, análisis de las fuerzas aplicadas en un canchilón, potencia mecánica obtenida en el eje de la turbina, rendimientos hidráulicos y trayectorias del agua. Con base en esta información podría predecirse el cambio en la eficiencia de un rodete desgastado y uno nuevo. En este compendio se comprueba que la eficiencia del inyector es cercana a la unidad, pues regularmente operan a aperturas en donde el chorro es sólido, por tal motivo, para efectos de cálculo se tomará en cuenta la potencia presente en el recurso hídrico como la potencia de entrada de la turbina.

En la publicación *Microturbinas Pelton* (Zuluaga, 2012) se habla sobre las implicaciones de un rodete desgastado sobre la intermitencia en la operación de una hidroeléctrica, hecho que afecta directamente en la rentabilidad de una hidroeléctrica. Esto se tomará en cuenta para las consecuencias de la falta de mantenimiento y para sustentar el reacondicionamiento. Se indica que la eficiencia en una turbina hidráulica Pelton en condiciones ideales tiene un rendimiento del orden del 90 %.

En el tema 6 (Turbinas Pelton) del libro *Máquinas de fluidos* (González, 2009) se indican los cánones generales para deducir matemáticamente la eficiencia de una turbina hidráulica tipo Pelton. Esta información servirá para determinar teóricamente cómo las diferencias en las dimensiones en los canjilones merman la eficiencia. Es importante mencionar que este estudio describe matemáticamente que las pérdidas volumétricas del inyector al rodete son depreciables en estos casos, ya que tienden a cero. Por tal motivo en los cálculos de la eficiencia no se tomarán en cuenta.

### 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La eficiencia de la producción energética de una turbina hidráulica tipo Pelton se ve afectada por el desgaste de los canjilones del rodete, ya que son estos elementos (canjilones) los responsables de extraer la mayor cantidad de energía del recurso hídrico. Al estar desgastados, los ángulos de incidencia del agua cambian y hacen que las fuerzas también incidan en distintos ángulos, lo cual genera una reducción de la eficiencia de la turbina.

El desgaste es causado generalmente por la presencia de sólidos en suspensión en el fluido, dichos sólidos provienen de los ríos, que son los que generalmente alimentan a una hidroeléctrica. La presencia de sólidos suspendidos en el agua tiene su origen en la naturaleza de los ríos, pues estos acarrean con su corriente desechos sólidos vertidos por poblaciones aguas arriba (envases PET y sus taparroschas, empaques de frituras, entre otros) y naturalmente también transportan arena o tierra.

La tierra o arena son partículas diminutas con potencial abrasivo muy grande que desgastan fácilmente los canjilones de una turbina, otra de las causas de desgaste de los canjilones es la dureza del agua, ya que el agua dura es alta en minerales (sales) y estos, al igual que la tierra o arena, tienen un efecto abrasivo sobre la superficie de los canjilones. Finalmente, otra de las causas del desgaste es la cavitación, que es la implosión súbita debido a la transformación del fluido en vapor, que se debe a las altas presiones que se forman con la colisión del agua y los canjilones.

Según Kalpakjian y Schmid, en su libro *Manufactura, ingeniería y tecnología*, en su cuarta edición, el desgaste es definido como la pérdida o remoción progresiva de material de una superficie, el cual cambia las dimensiones del canjilón en diferentes sitios y medidas, y el desgaste es aleatorio e incontrolable. La reducción de las dimensiones causa que el ángulo de incidencia del recurso hídrico sea diferente al diseñado por el fabricante, causando una reducción en la transformación y aprovechamiento de la energía contenida en el recurso hídrico a energía rotativa.

Una menor eficiencia de transferencia de energía en un rodete desgastado implica una menor eficiencia energética en la turbina. Otra consecuencia de un rodete desgastado es que existen paros de producción por mantenimiento más seguidos, lo que desemboca en mayores costos de operación asociados a mantenimiento.

Lo descrito en el párrafo anterior hace que disminuya la rentabilidad de la hidroeléctrica, debido a que se emplean más recursos para mantener operativa la planta (recurso humano, tiempo, herramientas, consumibles) y se produce menos energía eléctrica. Al aumentar los costos de operación es necesario aumentar el precio de la energía al que se va a vender, para equilibrar los costos de operación altos. El aumento del precio a su vez causará una reducción en la demanda.

Esto lleva a plantear la pregunta principal de este estudio: ¿cuánto mejora la eficiencia energética de una turbina hidráulica tipo Pelton después de un proceso de reacondicionamiento del rodete? Para responder a esta interrogante se deberán contestar las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿En qué medida se ve afectada la eficiencia de producción energética de una turbina hidráulica tipo Pelton conforme al aumento del desgaste de los canchales del rodete?
- ¿Cuál es la eficiencia de producción energética de una turbina hidráulica tipo Pelton con un rodete reacondicionado?
- ¿Existe mejora en la eficiencia de producción energética de una turbina hidráulica luego de un proceso de reacondicionamiento del rodete realizado con base en un manual de mantenimiento como guía y, si existe, cuál es la diferencia?



## 4. JUSTIFICACIÓN

La realización de la presente investigación se justifica en la línea de investigación de gestión y uso eficiente de la energía del área de gestión energética de la Maestría en Energía y Ambiente. Con esta investigación se aportará a la mejora de la eficiencia de las turbinas hidráulicas tipo Pelton, por medio del análisis del proceso de reacondicionamiento del rodete y las variables de producción energética antes y después de dicho proceso.

Con este trabajo se obtendrán matrices de la energía producida por las turbinas y el cálculo de las eficiencias energéticas conforme al tiempo de operación del rodete que está ligado intrínsecamente al desgaste del mismo. También se analizará el costo del reacondicionamiento de un rodete de una turbina hidráulica tipo Pelton, para determinar el punto de equilibrio en donde el mismo proceso se justifica por los costos.

Se obtendrán también datos de los desgastes a lo largo de la periferia superficial de los cangilones, si es necesario para la investigación, se analizarán triángulos de velocidad y cómo estos van cambiando los ángulos de incidencia que finalmente son las fuerzas que disminuyen la eficiencia en un rodete.

Los productos obtenidos serán de utilidad para todas las hidroeléctricas que tengan instaladas turbinas hidráulicas tipo Pelton, pues dará evidencia que el proceso de reacondicionamiento es necesario para mantener una mejor eficiencia. Mediante esta información los operadores de centrales hidroeléctricas podrán realizar análisis en sus plantas, específicamente para

evidenciar y justificar la necesidad de realizar un proceso de reacondicionamiento a sus rodetes.

También beneficiará al pueblo de Guatemala y a la población mundial en general, ya que se busca aumentar la eficiencia energética de las máquinas turbomotoras, lo que impactará positivamente en la producción de energía eléctrica por medios renovables que, a su vez, ayudará al medio ambiente a reducir la dependencia de las energías no renovables. Y por efectos de oferta y demanda, la mejora en la eficiencia aumentará la demanda y esto debería causar una reducción en el precio de la energía.

En Guatemala no se han realizado análisis para cuantificar el cambio en la eficiencia entre un rodete desgastado y uno nuevo. Por tanto, esta investigación es relevante debido a que se cuantificará el cambio en la eficiencia y se determinará si es recomendable realizar un proceso de reacondicionamiento del rodete.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. General**

Calcular la mejora en la eficiencia energética de una turbina hidráulica tipo Pelton después de un proceso de reacondicionamiento del rodete.

### **5.2. Específicos**

- Determinar en qué medida se ve afectada la eficiencia de producción energética de una turbina hidráulica tipo Pelton conforme se desgastan los cangilones del rodete.
- Calcular la eficiencia de producción energética de una turbina hidráulica tipo Pelton con un rodete reacondicionado.
- Comprobar si existe una mejora en la eficiencia de producción energética de una turbina hidráulica tipo Pelton, luego de un proceso de reacondicionamiento del rodete realizado con base en un manual de mantenimiento como guía y, si existe, determinar cuál es la diferencia.



## **6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN**

A partir del presente estudio se evaluará el proceso de reacondicionamiento de un rodete de una turbina hidráulica tipo Pelton y en qué medida este proceso incide en la eficiencia energética de la turbina. Mediante la investigación se podrá concluir que el proceso de reacondicionamiento se justifica técnica y financieramente antes del término de la vida útil de un rodete. Es importante mencionar que no existe un estudio de este tipo en Guatemala.

La necesidad de un proceso de reacondicionamiento es debido al desgaste de los canjilones del rodete. Este desgaste es causado por la mala calidad del agua que ingresa a los sistemas generadores. En esta investigación se harán recomendaciones para mejorar la calidad del agua de entrada para evitar el desgaste de los álabes del rotor y alargar la vida útil del mismo.

El presente estudio aportará la información necesaria para que todas las centrales hidroeléctricas que generen energía por medio de turbinas hidráulicas tipo Pelton evalúen la viabilidad de un proceso de reacondicionamiento, evaluando factores técnicos y financieros y en qué medida aumentará la eficiencia al realizar dicho procedimiento.

Al determinar lo anterior, se estará mejorando la eficiencia de la central hidroeléctrica, también aumentará la cantidad de energía que se estará brindando al Sistema Nacional Interconectado y una mayor cantidad de energía limpia en el mercado que finalmente reemplaza energías generadas por recursos no renovables.



## **7. MARCO TEÓRICO**

### **7.1. Centrales hidroeléctricas**

Las centrales hidroeléctricas se encargan de extraer energía del agua para transformarla en energía eléctrica. El objetivo de este capítulo es introducir al lector en el mundo de las centrales hidroeléctricas, por medio de una breve explicación de su funcionamiento y clasificación.

#### **7.1.1. Aspectos generales**

Una central generadora de energía eléctrica es una disposición de un sistema de tal manera que transforma distintas formas de energía en energía eléctrica, siempre existe una transformación de la forma primaria de energía a energía mecánica, con la cual, a través de generadores, se realiza la transformación de energía mecánica a eléctrica.

La transformación que sufre la energía se da por medio de acoples turbinas-generador, los cuales son impulsados por un fluido en movimiento, ya sea por viento, gases o agua. Este fluido impacta con las paletas, cucharas, álabes o cangilones (dependiendo del fluido y del diseño de la turbomáquina), causando que se intercambie energía entre el fluido y el elemento rotativo, convirtiéndose en movimiento mecánico rotativo, el cual es trasladado a un generador y este mismo, por medio de la ley de inducción electromagnética de Faraday, induce una corriente hacia el circuito de salida (González, 2009, p. 57).

De los fluidos impulsores se pueden mencionar algunos ejemplos, si se habla de aire como fluido, la energía eólica es el ejemplo perfecto, si se mencionan gases, podrían ser provenientes de la energía calorífica de un fluido producido por una caldera o por fisión nuclear y, por último, el agua, utilizada en hidroeléctricas, forma que es bastante conocida en Guatemala por su amplia utilización.

La presente investigación se enfocará en las centrales hidroeléctricas, ya que el estudio es sobre el reacondicionamiento de un rodete de una turbina hidráulica tipo Pelton.

### **7.1.2. Funcionamiento**

Es la energía cinética y potencial del recurso hídrico la que hace funcionar una central hidroeléctrica, energía que es causada por el movimiento del recurso hídrico (caudal) y un diferencial de altura del mismo, llamado caída neta. El agua es retenida mediante una presa, la cual se encarga de contener y regular el caudal proveniente de la cuenca de la que se aprovecha el recurso hídrico. Dicha presa está ubicada topográficamente aguas arriba.

No todas las hidroeléctricas cuentan con un embalse, el cual es un espacio, ya sea natural o artificial, designado para contener grandes volúmenes de líquido, mediante el cual se logra amortiguar los efectos tanto de demandas pico de energía eléctrica como de la entrega de agua de la cuenca (Rivera Guirola, 2009, p. 3).

El agua contenida en el embalse es regulada mediante distintos mecanismos hacia el desarenador, infraestructura que tampoco es generalizada en las centrales hidroeléctricas. El desarenador es el encargado de retener la

arena y desechos sólidos que traen las aguas a fin de evitar que ingresen a la tubería y dañen los mecanismos internos de los sistemas (Chávez, 2013, p. 26).

Antes de ingresar a la turbina hidráulica, el agua pasa por una tubería que conduce el fluido hacia la casa de máquinas, las turbinas reciben la energía del agua, ya sea a gran presión o velocidad, o una combinación de ambos factores, según las condiciones de cada central, lo que hace que el componente rotativo de la turbina, el rodete, gire (Rivera Guirola, 2009, p. 5).

El rodete o rueda de la turbina está acoplado, mediante un eje, al generador eléctrico, que, al girar, convierte la energía de movimiento rotativo en energía eléctrica en forma de corriente alterna, la cual mediante transformadores es convertida en corriente de baja intensidad y alta tensión, para ser entregada a la red de distribución, “la cual se encarga de transportar la energía en materiales conductores a grandes distancias en donde se encuentre la carga” (Marchegiani. 2004, p. 7). El cobre es el conductor más utilizado debido a su relación conductividad/costo. Ya habiendo obtenido gran parte de la energía del agua, es restituida al cuerpo de donde fue tomada, llamándole a esto el desfogue.

### **7.1.3. Clasificación**

Las centrales hidráulicas se clasifican según el salto y la forma de utilizar el recurso hídrico. Según el salto de agua, las centrales pueden ser como se explica a continuación (Arroyave, 2009, p. 7):

- Alta presión

Son centrales hidroeléctricas cuyos saltos son mayores de 200 m., con caudales relativamente pequeños, aproximadamente de  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ . Están ubicadas regularmente en terrenos escarpados y poseen tuberías muy largas (Arroyave, 2009, p. 7).

- Media presión

Centrales hidroeléctricas con saltos medios, entre 20 m. y 200 m., con caudales medianos, aproximadamente de  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ , regularmente necesitan de embalses para su operación (Arroyave, 2009, p. 7).

- Baja presión

Son aquellas con saltos pequeños, menores de 20 m., con caudales grandes, mayores de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  (Arroyave, 2009, p. 7).

Según la utilización del recurso hídrico las centrales hidroeléctricas pueden ser:

- Agua fluente

No cuentan con embalse como reservorio de agua, utilizan el caudal de la cuenca disponible en el momento, por lo que dependen de las estaciones del

año. “Regularmente tienen presas derivadoras para mantener un desnivel constante en la corriente del agua” (Arroyave, 2009, p. 7).

- Agua embalsada o de regulación:

Estas centrales son las que, mediante presas, crean grandes embalses para contener una reserva de agua, recurso que es utilizado según la demanda de las centrales (Arroyave, 2009, p. 8).

- De bombeo:

Son aquellas que, en momentos de baja demanda de energía, utilizan bombas de bajos costos para bombear al embalse aguas arriba, grandes cantidades de agua, y almacenar dicha energía en forma de energía potencial, para posteriormente utilizarla en momentos de alta demanda de energía eléctrica (Arroyave, 2009, p. 8).

#### **7.1.4. Centrales hidroeléctricas en Guatemala**

Guatemala, siendo un país con una gran diversidad de accidentes geográficos, presenta a lo largo y ancho de su territorio diferentes características, por lo que es posible utilizar diferentes tipos de turbinas hidráulicas. A continuación se describirán las principales características de las turbinas más utilizadas en Guatemala (Comisión General de Energía Eléctrica CNEE, 2018).

## **7.2. Turbinas hidráulicas**

Una turbina hidráulica es una turbomáquina motora hidráulica, que aprovecha la energía de un fluido que pasa a través de ella para producir un movimiento de rotación que, transferido mediante un eje, mueve directamente una máquina o bien un generador que transforma la energía mecánica en eléctrica, así son el órgano fundamental de una central hidroeléctrica.

### **7.2.1. Tipos de turbinas según su rodete**

Las turbinas hidráulicas, además de clasificarse por su cambio de presión, también se pueden clasificar por el tipo de rodete que tengan. A continuación se mencionarán las características de los tipos de turbinas más comunes.

#### **7.2.1.1. Turbinas Francis**

Desarrolladas por James B. Francis, son turbinas de reacción de flujo radial y admisión total, muy utilizadas en saltos de altura media. Tienen una gran versatilidad en cuanto a los saltos y caudales, es decir su rango de aplicación es bastante amplio, va desde los 20 hasta los 350 metros en caída neta y en caudales desde 1 hasta 50  $m^3/s$ , dependiendo del fabricante (Rivera Guirola, 2009, p. 4).

Son conocidas también como turbinas de admisión total, debido a que la totalidad del agua es distribuida alrededor de todo el rodete. La incidencia del agua sobre el rodete es radial y luego axial, es decir, en este cambio de dirección del recurso hídrico es en donde se da el intercambio de energías, que están compuestas por una mezcla de salto (energía potencial) y caudal (energía cinética) (Rivera Guirola, 2009, p. 4).

Es importante mencionar que, por ser una turbina de admisión total, no cuenta con inyectores, sino con palas directrices alrededor del rodete, los cuales cambian su posición según las condiciones que existan, esto con el objetivo de regular y controlar la potencia generada, dependiendo directamente del caudal del que se disponga. En su contraparte, las paletas del rodete son estáticas.

Dependiendo de los saltos de agua, existen varios tipos de turbinas Francis:

- Turbina Francis lenta:

Utilizada en grandes saltos, alrededor de los 200 metros o más (Chávez, 2013, p. 16).

- Turbina Francis normal:

Recomendable para saltos de altura media, entre los 20 y 200 metros (Chávez, 2013, p. 16).

- Turbina Francis rápida y extra rápida:

Apropiada para saltos pequeños inferiores a los 20 metros (Chávez, 2013, p. 16).

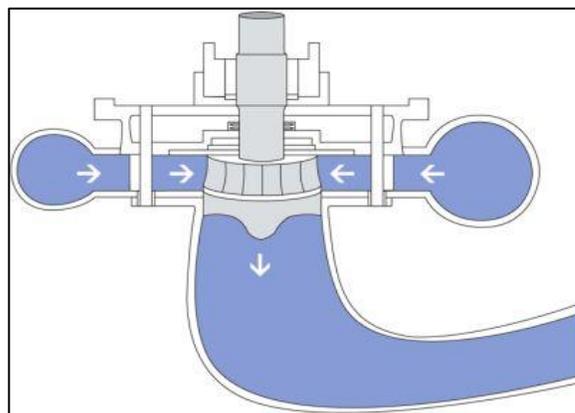
Las turbinas Francis se deben instalar en las centrales hidroeléctricas en gran número y de bajas potencias, ya que su eficiencia decae en operación parcial, por lo que se opta por tener varias turbinas, ya que al momento en que el caudal disminuye se reduce el número de turbinas en operación para

mantener el caudal de entrada por lo menos en un 60 % en las turbinas en funcionamiento, que es lo que se recomienda generalmente (Rivera Guirola, 2009).

“El funcionamiento de una maquina hidráulica del tipo Francis está basado en el intercambio de energías al igual que en toda turbina, en este caso el agua, es direccionada al rodete mediante los alabes directrices y se cambia de dirección en los alabes del mismo, a través de la desviación y aceleración posterior del agua en la rueda, se produce un impulso que se transmite al rodete” (Guerrero Ramirez, Estrada Mendoza, Antillán López, Hernández Torres, & Valdéz López, 2016, p. 16).

Las turbinas Francis pueden ser montadas ya sea vertical u horizontalmente. A continuación se muestra una imagen a corte de una turbina hidráulica tipo Francis con eje vertical (Rivera Guirola, 2009, p. 63).

Figura 1. **Turbina hidráulica tipo Francis**



Fuente: MASYAN (2012). *Software tolos for hydro power planning optimization.*

### 7.2.1.2. Turbinas Kaplan

Inventada por Viktor Kaplan, es muy semejante a la hélice de propulsión de un barco, solamente que hace el efecto contrario al de una embarcación, en vez de impulsar, es impulsada por el paso de grandes caudales de agua. Son uno de los tipos más eficientes de turbinas de agua a reacción de flujo axial.

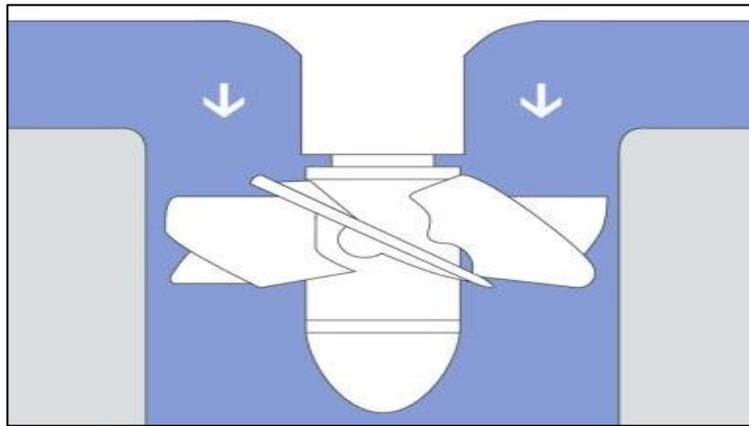
Al igual que la turbina Francis, es una turbina de reacción de admisión total, en donde la regulación del fluido depende solamente de compuertas. “Regularmente las turbinas Kaplan son utilizadas para saltos de agua pequeños, menores de los 50 m. y caudales entre los 5 y los 100  $m^3/s$ . Por sus características es una turbina rápida que puede llegar a desarrollar altas velocidades específicas” (Gramajo, 2009, p. 53).

Comparando con las turbinas Francis, las Kaplan son de menor envergadura, ya que el recorrido del fluido es solamente axial, es decir, es totalmente paralelo al eje de la turbina, por lo que no existe el distribuidor alrededor del rodete, reduciendo el espacio utilizado.

Por diseño son regularmente montadas verticalmente, pero también pueden ser montadas ya sea diagonal u horizontalmente. El funcionamiento de las turbinas en mención está basado en la interacción del ángulo de las palas de la hélice, el cual es variable para poder tener un mejor control de la producción de energía. Al aumentar el área de contacto con el agua se logra un aumento de potencia, ya que el efecto de la fuerza cortante del agua en la pala es mayor, e inversamente, al disminuir el área de contacto de las palas con el agua se reduce la potencia obtenida (Gramajo, 2009, p. 53).

A continuación se muestra una imagen de una turbina hidráulica tipo Kaplan montada verticalmente:

Figura 2. **Turbina hidráulica tipo Kaplan**



Fuente: MASYAN (2012). *Software tolos for hydro power planning optimization*.

### **7.2.1.3. Turbinas Pelton**

“Debe su nombre a Lester Allan Pelton quien concibió la idea de una rueda con cucharas que aprovechara la energía cinética de un chorro de agua, llamada también turbina tangencial, puesto que el chorro de agua incide tangencialmente en el rodete, a pesar de esto, es considerada como una turbina de flujo radial, admisión parcial y de acción. También se dice que es axial ya que el fluido a su paso por el canjilón tiene un recorrido axial. Además es importante mencionar que es uno de los tipos más eficientes de turbina hidráulica junto a las descritas anteriormente, siendo las Pelton consideradas de admisión parcial debido a la presencia de inyectores en su diseño” (Chávez, 2013, p. 7).

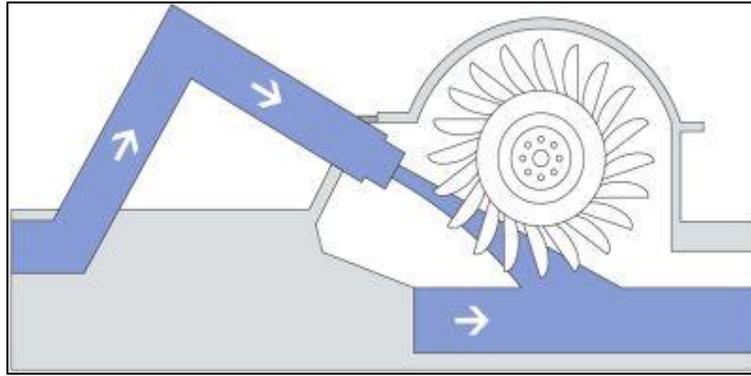
Las turbinas Pelton pueden ser instaladas ya sea horizontal o verticalmente, si en caso se montara una turbina Pelton con eje horizontal, esta solamente tendría uno o dos inyectores, puesto que es complicado instalar inyectores en la periferia de la máquina, ya que la gravedad afectaría grandemente, por lo que se puede generalizar que las turbinas hidráulicas tipo Pelton instaladas horizontalmente solo pueden tener un número reducido de inyectores, mientras que las montadas en eje vertical pueden tener hasta 6 inyectores o chorros (Chávez, 2013, p. 7).

“El principio de funcionamiento de una turbina de este tipo es relativamente simple, ya que es una evolución lógica de la antigua rueda hidráulica. Es importante mencionar que posee las mejores características para grandes saltos ya que es la única turbomáquina que tiene la capacidad de funcionar con alturas superiores a 1 700 m. Se afirma entonces que la aplicación de estas turbinas es en aquellos aprovechamientos hidráulicos en los que el salto predomina sobre el caudal” (Chávez, 2013, p. 7).

A cargas parciales tienen un gran rendimiento en comparación con las otras que disminuyen su rendimiento en las mismas condiciones. El funcionamiento de una turbina hidráulica tipo Pelton se debe al par de fuerza ejercido por un chorro de alta velocidad lanzado a la atmósfera por una tobera. El impacto del fluido con los cangilones ubicados en la periferia de una rueda, llamada rodete, lo impulsa transfiriendo su energía al mismo. Luego de haber hecho la transferencia de energía, el agua sale de los cucharones y es dirigida hacia el canal de desagüe, que posteriormente restituye el caudal al cauce del río. (García, 2005, p. 28)

A continuación se muestra una imagen de una turbina tipo Pelton con eje horizontal de un inyector.

Figura 3. **Turbina hidráulica Pelton**



Fuente: MASYAN (2012). *Software tolos for hydro power planning optimization*.

### **7.2.2. Elementos de las turbinas hidráulicas tipo Pelton**

Una turbina hidráulica está compuesta por infinidad de partes, las cuales están dispuestas de forma milimétrica y hacen de la misma una de las más eficientes turbomáquinas existentes. A continuación se detallarán las partes más importantes de una instalación para comprender el funcionamiento y entrar en detalle de lo que más interesa: el rodete.

#### **7.2.2.1. Tubería de presión**

También llamadas tuberías forzadas, tienen como objetivo conducir el agua desde el punto en donde cuenta con gran energía potencial (presa) hasta las turbinas ubicadas en la casa de máquinas. Es en la casa de máquinas en donde sucede la transformación de energía, con apoyo de la ley de la conservación de la energía, que afirma que mientras el agua pierde energía potencial, adquiere energía cinética.

Es importante mencionar que, debido a estos cambios de energía, la tubería está sujeta a movimientos y vibraciones, por lo que debe estar debidamente apoyada y anclada. Es también importante que la tubería forzada cuente con juntas de expansión debido a las distintas fuerzas a las que puede llegar a estar sometida.

#### **7.2.2.2. Rodete**

El rodete, encargado de la transformación fundamental de energía de este proceso, se encarga de extraer la mayor energía posible del fluido y transformarla en energía mecánica rotativa..

El rodete montado en las turbinas de tipo Pelton regularmente es obtenido de un *monoblock* forjado, el cual cuenta con cangilones y está firmemente fijado al eje por medio de pernos antifatiga.

### **7.3. Rodetes Pelton**

El rodete es el elemento mecánico rotativo de la turbina que hace la transformación de energía más importante. A continuación se dan más detalles de los rodetes.

#### **7.3.1. Definición**

Según la Real Academia Española, el rodete es una rueda horizontal con paletas de una turbina hidráulica, una definición más adaptada a este trabajo de graduación es la siguiente: “consiste en un disco perpendicular al eje de giro, compuesto por canchilones curvados en dirección contraria al movimiento”.

Según los esfuerzos que deba soportar y la agresividad del medio al que esté expuesto, el rodete puede estar hecho de aleación metálica o de algún polímero (Martínez, 2012, pág. 12).

El rodete es un elemento fundamental en la operación de una turbina hidráulica. Es el encargado de la transformación fundamental de energía de este proceso, se encarga de extraer la mayor energía posible del fluido y transformarla en energía mecánica rotativa.

### **7.3.2. Problemas en el rodete**

Debido a que el rodete es el dispositivo que recibe el impacto del agua, y teniendo el agua, en la mayoría de los casos, un alto contenido de sedimentación, es el elemento que más desgaste sufre en una turbina hidráulica, ocasionando un efecto abrasivo. Por lo que los rodetes deben ser cambiados o reacondicionados en períodos de 15 a 20 meses en operaciones continuas. Los problemas más comunes se describirán a continuación.

#### **7.3.2.1. Erosión**

A continuación la explicación de la erosión según Rivera Guirola:

“La erosión es considerada como la degradación o pérdida de material provocada por la incidencia de partículas sobre una superficie. El grado de desgaste tiene relación con el ángulo de incidencia de las partículas respecto de la superficie” (Rivera Guirola, 2009, p. 10).

“Los metales, al ser golpeados continuamente por sedimentos a un ángulo aproximado de 20°, crean una fuerza de corte que desprende el material,

causando así un desgaste continuo que debilita el mismo. Se deduce que un material dúctil se endurecerá por el trabajo realizado por el impacto de las partículas, endureciéndolo y por consiguiente fragilizándolo, lo que al final terminará con agrietamiento de la superficie hasta que finalmente falle” (Servicios de Ingeniería. S.L., 2018, p. 43).

“Es por esta razón que se hace evidente la necesidad de darle mantenimiento al rodete para restaurar las superficies dañadas por medio de la aplicación de un material resistente y de fácil aplicación” (Rivera Guirola, 2009, p. 10).

#### **7.3.2.2. Cavitación**

A continuación la explicación de la cavitación según Rivera Guirola:

“La cavitación se da cuando un fluido es sometido a una diferencia de presión, cuando ésta presión es menor que su presión de vapor, el líquido en el instante hierve y forma burbujas o cavidades de vapor, de donde toma su nombre. Estas burbujas son transportadas por el líquido hasta llegar a una región de mayor presión, en donde el vapor formado regresa al estado líquido inicial de una manera súbita, lo que provoca que las burbujas implosionen bruscamente. Si dichas burbujas o cavidades implosionan cerca de algún material, las fuerzas ejercidas dan lugar a presiones localizadas muy altas, ocasionando de esta manera picaduras sobre la superficie” (Rivera Guirola, 2009, p. 11).

Según Gramajo en 2009 y Chávez en 2013, se ha evidenciado que las presiones que se pueden llegar a alcanzar superan los 400 MPa. Presión que, al ser aplicada a un área determinada, logra deformar los metales hasta su

zona plástica. Este problema es muy común en turbinas hidráulicas y más si se habla específicamente de las del tipo Pelton, ya que estas soportan grandes presiones debidas a los grandes saltos. “El daño por cavitación tiene aspecto semejante a picaduras por corrosión con la diferencia que las zonas dañadas son mucho más localizadas y es más irregular el daño”. (Rivera Guirola, 2009, p. 11).

“Según un estudio la introducción de pequeñas cantidades de aire en el agua reduce el daño causado por la cavitación, o bien se puede utilizar una protección del tipo catódica la cual también reduce estos efectos”. (Rivera Guirola, 2009, p. 11). Al ser este un problema crónico se afirma que provoca daños en los conductos, produce ruido y vibraciones, por lo que disminuye la eficiencia de la máquina.

Figura 4. **Rodete nuevo vs. rodete erosionado por cavitación**



Fuente: elaboración propia.

En la imagen anterior se muestran cangilones de un rodete nuevo a la par de uno ya desgastado por las condiciones de operación.

### **7.3.3. Mantenimiento de un rodete**

El mantenimiento dado a las turbinas Pelton puede ser agrupado en tres tipos:

- Mantenimiento predictivo

Monitoreo de indicadores por medio de sensores para identificar señales de sospecha de anomalías tales como vibraciones, presiones, temperaturas, niveles, análisis de partículas y agua en lubricantes, entre otros. La lectura de indicadores fuera de los rangos permisibles será analizada e interpretada para tomar decisiones con base en las conclusiones.

- Mantenimiento preventivo

Es la programación de procedimientos para resguardar las condiciones de la maquinaria, inclusive, la reparación de averías cuando todavía la maquinaria se encuentra dentro de límites aceptables con el afán de no incurrir en paradas innecesarias. Este tipo de mantenimiento comprende visitas, revisiones, lubricación y limpieza periódicas.

- Mantenimiento correctivo

“Son todas aquellas acciones que se realizan con el fin de restablecer la operación cuando surge algún problema que para la maquinaria, aun en las plantas con los mantenimientos predictivo y preventivo eficaces ocurren imprevistos, por lo que es recomendable tener un equipo para realizar este tipo de mantenimiento”.

#### **7.3.4. Reacondicionamiento de un rodete**

Es un procedimiento que tiene como meta devolverle al rodete usado las características de uno nuevo, o por lo menos acercarlo a lo más parecido posible. Como bien se ha mencionado a lo largo de la investigación, los diversos problemas, tales como la erosión, cavitación y sólidos suspendidos en el agua, desgastan el rodete, disminuyendo sus dimensiones estándares de diseño. Al ser modificadas las dimensiones, el rodete ya no se comporta de la manera más eficiente, ya que se crean fuerzas no deseadas que limitan la rotación del elemento y por consiguiente la generación de energía.

Según el fabricante famoso Andritz, aproximadamente a las 18 000 horas de operación es recomendable el cambio de rodete o su reacondicionamiento. Pero debido a la dureza del agua y los sólidos que acarrea, este número se ve disminuido. Seguido de esto encontrará detalladamente el procedimiento de reacondicionamiento de un rodete Pelton. (Andritz, 2012, p. 3).

##### **7.3.4.1. Ensayos no destructivos**

Se denomina a cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales, pero que dan indicios muy certeros de las propiedades y estado del material. Las pruebas no destructivas se aplican a los rodetes, ya que siendo estos muy costosos, no se pueden probar hasta llevarlos a sus límites, incurriendo en el riesgo de arruinar el rodete.

Los ensayos no destructivos en general buscan verificar la homogeneidad y continuidad del material analizado, tanto en la superficie como en el interior.

Las pruebas utilizadas regularmente en estos procedimientos son las descritas a continuación.

#### **7.3.4.1.1. Partículas magnéticas**

Sirve para detectar discontinuidades en materiales ferromagnéticos, consiste en hacer pasar una corriente eléctrica para crear un campo magnético, el cual se altera ante la presencia de discontinuidades, el polvo magnético es el encargado de evidenciar el cambio de estos campos que evidencian discontinuidades ya sea en la superficie o en el interior de la pieza analizada..

#### **7.3.4.1.2. Ultrasonido**

Al igual que las partículas magnéticas, tratan de mostrar discontinuidades en el material, pero en este caso más profundas, se realiza por medio de vibraciones, las cuales son emitidas y recibidas por un mismo aparato, el cual detecta cambios en la amplitud de las ondas, dicho cambio denota una discontinuidad en el material.

#### **7.3.4.1.3. Líquidos penetrantes**

Son líquidos que sirven para verificar fisuras o poros en la superficie del material, los cuales penetran en los defectos superficiales, evidenciándolos (Rivera Guirola, 2009, p. 63).

#### **7.3.4.1.4. Comparación de peso**

Consiste en la simple comparación del peso del rodete usado con el peso de un rodete nuevo, esto indica fielmente la cantidad de material perdida en

peso. Sirve para realizar un cálculo aproximado del material necesario que se ha de aportar para alcanzar la especificación del fabricante.

#### **7.3.4.1.5. Mediciones y cartografía**

Se realizan mediciones del rodete tomando como base las plantillas construidas por el fabricante. Dicho estudio determinará las condiciones del rodete antes del inicio del aporte de material, ayudando a determinar la trayectoria y sentido del aporte de cada canjilón. Este dato obtenido se traslada a formatos llamados cartografías en donde se logra apreciar de mejor manera las medidas y por consiguiente el desgaste del rodete, que en cada rodete y en cada canjilón es distinto.

#### **7.3.4.2. Preparación de la superficie**

Consiste en la detección y eliminación de poros evidenciados por los ensayos no destructivos. Al detectar una discontinuidad en la superficie los operarios deben marcarla y posteriormente eliminarla por medio del desbaste de las proximidades del poro, esto se realiza para procurar que el proceso de aporte sea lo más homogéneo posible. El desbaste del material se realiza por medio de puntas montadas o discos de desbaste según el tamaño y características del poro.

Figura 5. **Detección de poros**



Fuente: elaboración propia.

### **7.3.4.3. Proceso de aporte**

El proceso de aporte se realiza por medio de soldadura, el fin de este paso es rellenar el material que ha sido desgastado por erosión al rodete, es decir llevarlo a sus dimensiones originales mediante el aporte de material por un proceso de soldadura. En sus diferentes etapas se utilizan diferentes técnicas, máquinas y materiales, las cuales son explicadas a mayor detalle posteriormente (Rivera Guirola, 2009, p. 23).

#### **7.3.4.3.1. Pre calentamiento del rodete**

Es importante seguir las indicaciones del fabricante del insumo utilizado en cada parte del proceso de soldadura, debido que cada tipo de máquina y cada tipo de electrodo tiene sus especificaciones de fábrica, tales especificaciones incluyen el pre calentamiento de la pieza a soldar, esto para evitar un choque

térmico debido a que la soldadura eleva de forma súbita las temperaturas de las zonas próximas al lugar del aporte, dicha zona es llamada zona afectada térmicamente (ZAT). Mientras el diferencial de temperatura sea menor, menos esfuerzos internos se crearán en el rodete, por lo que es imperativo obedecer las indicaciones descritas por el fabricante del insumo.

El precalentamiento del rodete se realiza por medio de la exposición a una llama creada por un soplete, la cual es direccionada hacia los cangilones próximos a ser trabajados con el paso del aporte. La temperatura que indica el fabricante, que en este caso es UTP, está entre el rango de 90 °C a 110 °C, y el máximo de temperatura entre pases recomendado por el fabricante es de 150 °C.

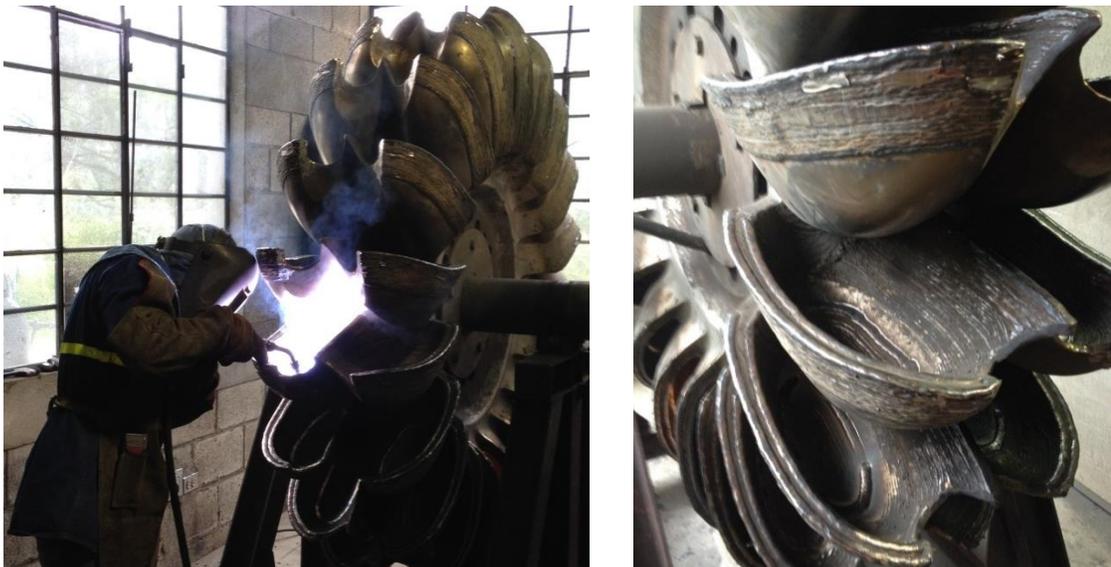
#### **7.3.4.3.2. Soldadura MAG/MIG**

Llamada así por sus siglas en inglés: *Metal Active Gas* o *Metal Inert Gas*, son procesos de soldadura por arco bajo gas protector con electrodo consumible, el arco se produce mediante un electrodo formado por un hilo continuo y las piezas a unir, quedando este protegido de la atmósfera circundante por un gas inerte (soldadura MIG) o por un gas activo (soldadura MAG). Para la reparación de los rodetes de las turbinas se utiliza como material de aporte alambre tubular 410 Ni Mo de 1,2 mm de diámetro. Siendo protegido el aporte por el gas inerte dióxido de carbono ( $CO_2$ ) para así evitar la oxidación del metal aportado (Rivera Guirola, 2009, p. 22).

Este proceso es utilizado ya que tiene muchos beneficios para el proceso de aporte, los cuales se enumeran a continuación:

- Es más rápido que el sistema convencional de soldadura por arco eléctrico con electrodo metálico revestido, ya que no hay necesidad de cambiar de electrodo muy seguido.
- Es un proceso de soldadura mucho más limpio, es decir que deja menos poros, aunado a esto no deja impurezas ni escoria.
- El rendimiento gravimétrico de un electrodo continuo es mayor que el de un proceso de soldadura electrógena.
- La zona afectada térmicamente es menor, ya que la temperatura cuando se crea el arco eléctrico es menor.

Figura 6. **Aporte por medio de soldadura MAG**



Fuente: elaboración propia.

En la imagen anterior se muestra a un operario aportando material a los cangilones con proceso de soldadura MAG y en la otra imagen se muestra el acabado rústico después de haber realizado el aporte, el cual posteriormente es desbastado y pulido.

#### **7.3.4.3. Soldadura por arco eléctrico manual con electrodo metálico revestido**

Mayormente conocida como soldadura eléctrica, es la forma más convencional de soldadura, la cual funde el material de aporte y el material a soldar por medio del calor cedido por el arco eléctrico creado al cerrar el circuito eléctrico que, al solidificarse, se forma una unión permanente.

En la reparación de rodets Pelton regularmente se utiliza electrodo revestido E410 NiMo-15, según la especificación de la American Welding Society AWS A5.4, el cual es especialmente diseñado para unir aceros inoxidables al cromo y aceros fundidos al cromo-níquel. Se recomienda, por parte de los operarios, utilizar electrodo UTP-6635 en sus diferentes diámetros. Este tipo de soldadura se utiliza en los lugares en donde el acceso es muy limitado y la soldadura MAG no es capaz de llegar.

#### **7.3.4.4. Trazado**

Este paso se realiza cuando el rodete ya ha alcanzado la temperatura ambiente después de haberse hecho el aporte, consiste básicamente en marcar los puntos para comenzar el proceso de desbaste. Para este paso del proceso de reacondicionamiento es necesario comparar las medidas a manera de evitar futuros contratiempos.

Si en caso se necesitan hacer varios cordones de soldadura como aporte, el objetivo de este paso es marcar los puntos en donde hay que desbastar para dejar la superficie apta para que cuando se realice la otra capa de aporte, no existan agujeros que puedan quedar como poros.

#### **7.3.4.5. Desbaste y pulido**

Luego de haber hecho el trazado, se realiza el desbaste del rodete para poder llegar a las dimensiones originales del mismo, este se da en dos procesos, primero se realiza el desbaste del área cóncava de cada cangilón, por su facilidad y comodidad. Se realiza con discos abrasivos de 4,5" y discos laminados, los últimos sirven para dar un acabado de pulido. Este proceso utiliza una rotolimadora de eje flexible.

El segundo proceso es el desbaste en áreas de difícil acceso, tales como las raíces de los cangilones. Por la complejidad del mismo, este proceso se realiza con abrasivos compactos, llamados puntas montadas para el desbaste y ruedas *flap* para el pulido. Como fuerza motriz se utiliza una rotolimadora marca Suhner, de la cual se muestra una imagen a continuación.

Figura 7. **Rotolimadora de eje flexible**



Fuente: elaboración propia.

#### **7.3.4.6. Acabado final**

El acabado se realiza previo a la verificación a manera de dejar la superficie lo más lisa posible, puliéndola con abrasivos de granos más finos. Para este proceso se utilizan discos laminados de granos 80 y 120.

#### **7.3.4.7. Verificación del aporte**

Esta es la última revisión de medidas que se le realiza al rodete, para este proceso se montan las plantillas y se verifica si las dimensiones se encuentran dentro de las tolerancias que el fabricante estipula. De no cumplir con los requerimientos, se regresa a los pasos anteriores para hacer cumplir este requisito. Si se cumplen las condiciones se procede a realizar de nuevo

ensayos no destructivos para verificar de una forma más técnica el estado del rodete reacondicionado

#### **7.3.4.8. Balanceo dinámico**

El objetivo primordial del balanceo es hacer coincidir el centro de gravedad del rodete con el centro de rotación, a manera de eliminar la mayor cantidad de fuerzas inerciales excéntricas. En Guatemala esta etapa del reacondicionamiento regularmente es subcontratada a una empresa especializada para este proceso debido a que para realizar este procedimiento se necesita una máquina muy especializada y costosa.

El balanceo dinámico consiste en el desbaste de la parte externa de los cangilones, solamente de ser necesario se hace un ajuste en el interior del cangilón, mas no es recomendado por el fabricante.

#### **7.3.4.9. Tratamiento térmico**

Por último, se realiza el tratamiento térmico que busca cambiar la estructura y conseguir las propiedades físicas y mecánicas necesarias, proceso mediante el cual se eliminan tensiones internas, se reduce la dureza y se eleva la resiliencia del material. El tratamiento térmico más utilizado es un revenido que alcanza regularmente los 580 °C, con una velocidad de calentamiento de 19 °C/h, con una permanencia en 580° de 4 h. y la velocidad de enfriamiento de 13 °C/h, tomando en cuenta que a partir de los 200 °C el enfriamiento debe ser a temperatura ambiente. El tratamiento térmico dura aproximadamente, dependiendo de la temperatura ambiente, entre 62 y 72 horas (Rivera Guirola, 2009, p. 30).



## 8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

HIPÓTESIS

RESUMEN DEL MARCO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN

### 1. MARCO TEÓRICO

#### 1.1. Centrales hidroeléctricas

1.1.1. Aspectos generales

1.1.2. Funcionamiento

1.1.3. Clasificación

1.1.4. Centrales hidroeléctricas en Guatemala

#### 1.2. Turbinas hidráulicas

1.2.1. Tipos de turbinas según su rodete

1.2.1.1. Turbinas Francis

1.2.1.2. Turbinas Kaplan

1.2.1.3. Turbinas Pelton

1.2.2. Elementos de las turbinas hidráulicas tipo Pelton

1.2.2.1. Tubería de Presión

1.2.2.2. Inyectores

- 1.2.2.3. Rodete
- 1.3. Rodetes Pelton
  - 1.3.1. Definición
  - 1.3.2. Características del rodete
  - 1.3.3. Problemas en el rodete
    - 1.3.3.1. Erosión
    - 1.3.3.2. Cavitación
    - 1.3.3.3. Sólidos en el agua
  - 1.3.4. Mantenimiento de un rodete
  - 1.3.5. Reacondicionamiento de un rodete
    - 1.3.5.1. Ensayos no destructivos
      - 1.3.5.1.1. Partículas magnéticas
      - 1.3.5.1.2. Ultrasonido
      - 1.3.5.1.3. Líquidos penetrantes
      - 1.3.5.1.4. Comparación de peso
      - 1.3.5.1.5. Mediciones y cartografía
    - 1.3.5.2. Preparación de la superficie
    - 1.3.5.3. Proceso de aporte
      - 1.3.5.3.1. Pre calentamiento del rodete
      - 1.3.5.3.2. Soldadura MAG/MIG
      - 1.3.5.3.3. Soldadura por arco eléctrico manual con electrodo metálico revestido
    - 1.3.5.4. Trazado
    - 1.3.5.5. Desbaste y pulido
    - 1.3.5.6. Acabado final

- 1.3.5.7. Verificación del aporte
    - 1.3.5.8. Balanceo dinámico
    - 1.3.5.9. Tratamiento térmico
  - 1.4. Eficiencia energética
- 2. RECOLECCIÓN DE DATOS
  - 2.1. Idealizaciones de la investigación
  - 2.2. Análisis energético
    - 2.2.1. Determinación del potencial energético disponible
    - 2.2.2. Determinación de la producción de energía de una turbina hidráulica tipo Pelton
  - 2.3. Determinación de costos
    - 2.3.1. Determinación de los costos de reacondicionamiento de un rodete
      - 2.3.1.1. Horas-hombre
      - 2.3.1.2. Electricidad
      - 2.3.1.3. Insumos
        - 2.3.1.3.1. Soldadura
        - 2.3.1.3.2. Abrasivos
        - 2.3.1.3.3. Equipo de seguridad Industrial
        - 2.3.1.3.4. Herramienta
        - 2.3.1.3.5. Maquinaria
      - 2.3.1.4. GLP
      - 2.3.1.5. Moldes
      - 2.3.1.6. Servicios tercerizados
      - 2.3.1.7. Transporte
    - 2.3.2. Resumen de costos de reacondicionamiento

- 2.3.3. Determinación de los costos de la compra de un rodete nuevo
    - 2.3.3.1. Costo del rodete
    - 2.3.3.2. Embarque
    - 2.3.3.3. Impuestos
    - 2.3.3.4. Transporte seguro
  - 2.3.4. Resumen de costos de compra de rodete
  - 2.4. Manual de mantenimiento
3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS
- 3.1. Energía disponible
  - 3.2. Producción de energía de una turbina hidráulica tipo Pelton con rodetes en distintos estados de desgaste
  - 3.3. Costos
    - 3.3.1. Costos del proceso de reacondicionamiento
    - 3.3.2. Costos del proceso de compra de un rodete nuevo
  - 3.4. Discusión de resultados
4. ANÁLISIS DE COSTOS / ANÁLISIS FINANCIERO
- 4.1. Valor Actual Neto
  - 4.2. Tasa Interna de Retorno

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

ANEXOS

## **9. METODOLOGÍA**

### **9.1. Tipo de estudio**

La presente investigación es de tipo cuantitativa-descriptiva, esta considera evaluar en qué medida mejora la eficiencia energética de una turbina hidráulica tipo Pelton después de un proceso de reacondicionamiento del rodete. El alcance de esta investigación no comprobará una hipótesis.

### **9.2. Fases del estudio**

El trabajo de graduación se dividirá en cuatro fases, las cuales se detallan a continuación.

#### **9.2.1. Fase 1: exploración bibliográfica**

En la primera fase se realizará una consulta de todas las bibliografías posibles relacionadas al tema, para enriquecer los conocimientos sobre eficiencias energéticas de turbinas hidráulicas tipo Pelton y las variables que influyen en esta.

Con base en la información investigada se tendrá una mejor visualización de la metodología a utilizar, para estudiar las variables que afectan en la eficiencia energética de un rodete de una turbina tipo Pelton y en qué medida alteran la eficiencia cada una de estas variables.

## **9.2.2. Fase 2: recolección de datos**

A continuación se describe la recolección de datos.

### **9.2.2.1. Idealizaciones necesarias para la construcción de un modelo manejable**

Dada la complejidad que representan las pérdidas de energía en el estudio de las eficiencias en sistemas reales, se consideran las siguientes idealizaciones para realizar un análisis viable de eficiencias:

- El potencial energético del recurso hídrico que se utilizará será la potencia de entrada, se considerará despreciable la pérdida de energía entre el inyector y el rodete (González, 2009, p. 1).
- Se considerarán despreciables las pérdidas de potencia relacionadas con la tubería forzada y el inyector (González, 2009, p. 1).
- No se considerarán pérdidas volumétricas, puesto que el rodete está abierto a la atmósfera (González, 2009, p. 1).
- No se considerarán las pérdidas mecánicas, puesto que en todos los escenarios existirá esta pérdida de energía (González, 2009).
- Se considerará que la turbina opera siempre a un mismo número de revoluciones (González, 2009, p. 1).

### **9.2.2.2. Determinación del potencial energético en el recurso hídrico**

Antes de iniciar cualquier tipo de análisis es importante saber la situación actual del sistema, por lo que se recomienda cuantificar la energía con la que se cuenta para producir energía eléctrica. En este caso, por ser una hidroeléctrica,

toda la energía disponible proviene del recurso hídrico, para tal efecto se calculará la cantidad de energía disponible en el inyector de la turbina hidráulica. Este punto es la referencia de la energía disponible.

Para determinar este dato se utilizará la ecuación de potencia de entrada descrita por González, la cual se muestra a continuación:

La potencia de entrada es la potencia del flujo a la entrada. La potencia de que dispone el fluido para ceder a la turbomáquina. Se puede expresar como:

$$P_E = \rho G Q H$$

Donde:

$P_E$  = Potencia de Entrada

$\rho$  = Densidad del fluido (en este caso agua)

$G$  = Gravedad

$Q$  = Caudal

$H$  = Diferencia de alturas entre la toma de agua y el punto de utilización

Mediante el cálculo de esta magnitud se tiene un punto de partida y de referencia para el cálculo de las eficiencias.

### 9.2.2.3. Determinación de la producción de energía de una turbina hidráulica tipo Pelton con rodete nuevo, desgastado y reacondicionado

A manera de referencia también es importante saber cuál sería la producción de una turbina hidráulica en sus condiciones ideales, es decir con un rodete nuevo. Esta referencia servirá para realizar comparaciones con la producción de energía entre los siguientes escenarios:

- Producción de energía con rodete nuevo
- Producción de energía con rodete desgastado
- Producción de energía con rodete reacondicionado

Para realizar esta medición se tomarán datos en condiciones iguales para cada uno de los escenarios y se llenará la siguiente tabla para documentar los resultados:

Tabla I. **Producción de energía de una turbina hidráulica con rodetes en distinta condición**

Condición del Rodete	Fecha y hora	Producción de energía (KW)	Diferencia de potencial (voltios)	Corriente (amperios)	Horas de operación
Nuevo					
Nuevo					
Gastado					
Gastado					
Reacondicionado					
Reacondicionado					
N...					

Fuente: elaboración propia.

#### 9.2.2.4. Determinación de los costos de reacondicionamiento de un rodete desgastado versus la compra de un rodete nuevo al fabricante

Para determinar financieramente la viabilidad del reacondicionamiento de un rodete de una turbina hidráulica tipo Pelton versus la compra de un ejemplar nuevo al fabricante, se debe realizar la cuantificación de los costos asociados al procedimiento del reacondicionamiento y la cuantificación de los costos asociados a la importación de un rodete nuevo desde la fábrica.

Los costos serán analizados en una matriz para cada caso, a continuación las matrices correspondientes:

Tabla II. Costo del reacondicionamiento del rodete

Descripción	Costo asociado (Q.)
Mano de Obra	
Electricidad	
Insumos (Soldadura, Abrasivos, EPP, Herramienta, Maquinaria)	
Gas Licuado de Petróleo (Tratamientos Térmicos)	
Moldes	
Servicios Tercerizados (Balanceo Dinámico)	
Transporte	
<b>Total</b>	

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Costo de la compra e importación de un rodete nuevo**

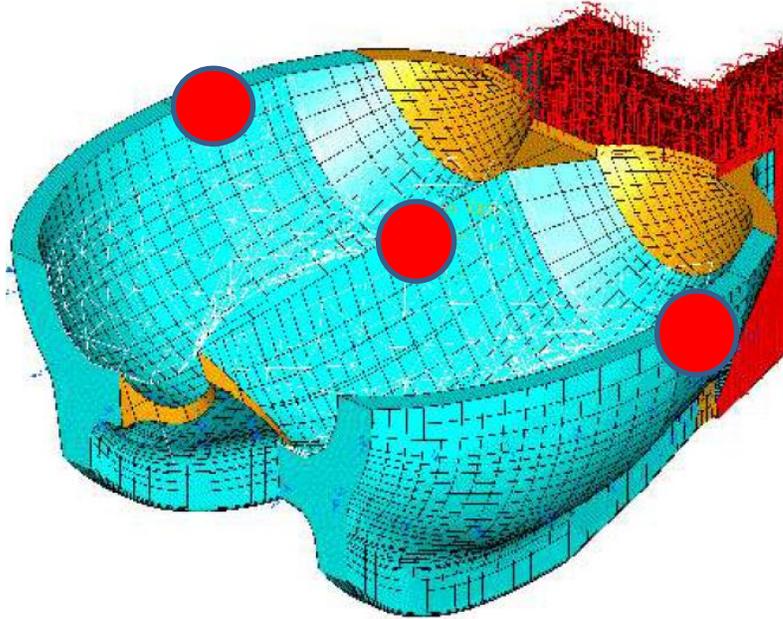
<b>Descripción</b>	<b>Costo asociado (Q.)</b>
Costo del Rodete nuevo	
Embarque	
Impuestos	
Transporte	
Seguro	
<b>Total</b>	

Fuente: elaboración propia.

#### **9.2.2.5. Determinación del desgaste del rodete en función de las horas de operación**

Para determinar el cambio de las dimensiones en el rodete debido al desgaste se realizarán mediciones en los 3 puntos críticos del rodete (en donde sufre más desgaste). A continuación se presenta una imagen de los puntos en donde se tomarán medidas en los rodetes para contar con datos y realizar un análisis correlacional de cómo estos cambios en las dimensiones afectan a la eficiencia de la producción de energía:

Figura 8. **Puntos de toma de medidas en canchilones**



Fuente: ZULUAGA, J. (2012) *Microturbinas Pelton*.

Las mediciones realizadas se documentarán en una tabla para luego ordenarlas y analizarlas. La tabla se muestra a continuación:

Tabla IV. **Desgaste del rodete**

Identificación del Rodete	Desgaste (mm.)			Ultima producción promedio del Rodete (KW)
	1	2	3	
1.1				
2.1				
1.2				
2.2				

Fuente: elaboración propia.

#### **9.2.2.6. Manual de mantenimiento**

Se realizará un manual de mantenimiento para realizar un reacondicionamiento básico a un rodete de una turbina Pelton, esto con el objetivo de que los procedimientos sean estándares y de garantizar de esta forma que los resultados sean similares en cada proceso de reacondicionamiento.

### **9.3. Fase 3: análisis de datos**

Con los datos obtenidos se procederá a realizar varios análisis, los cuales se mencionan a continuación:

#### **9.3.1.1. Correlación de la producción de energía de una turbina hidráulica tipo Pelton con rodete nuevo, desgastado y reacondicionado y las horas de operación**

Se realizará un análisis correlacional entre la producción de la energía de una turbina hidráulica con rodetes en distintas condiciones (nuevo, desgastado y reacondicionado) y las horas de operación, para determinar la diferencia de las eficiencias entre cada una de las condiciones. Este análisis permitirá cuantificar la mejora de la eficiencia energética de una turbina hidráulica tipo Pelton después de un proceso de reacondicionamiento.

### **9.3.1.2. Análisis del desgaste del rodete en función de las horas de operación**

Mediante este análisis se realizará un monitoreo de cómo el desgaste evoluciona, y se verificará la varianza de cada una de las lecturas del desgaste en las dimensiones de cada canjilón versus las horas de operación.

Estas distintas observaciones resultarán en el detalle de las partes de la cuchara o canjilón que primero sufren desgaste, lo cual podrá evidenciar oportunidades de mejora en cuanto a revestimientos o distintos materiales a utilizar para retardar el desgaste

### **9.3.2. Fase 4: análisis financiero**

A continuación se describe el análisis financiero.

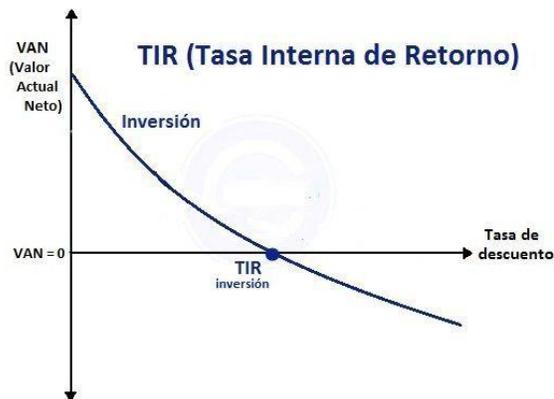
#### **9.3.2.1. Comparación de los costos de reacondicionamiento de un rodete desgastado versus la compra de un rodete nuevo al fabricante y análisis financiero**

El análisis de estas variables establecerá la diferencia económica existente entre realizar un proceso de reacondicionamiento a un rodete desgastado y la compra de un rodete nuevo. Finalmente, mediante este análisis se podrá deducir la viabilidad económica y financiera del proceso de reacondicionamiento.

### 9.3.2.2. Herramientas de análisis financiero

Para deducir la viabilidad económica y financiera del proceso de reacondicionamiento del rodete se realizará un cálculo y análisis del valor actual neto (VAN) y un análisis de la tasa interna de retorno (TIR), para definir si cumple las expectativas esperadas.

Figura 9. Tasa interna de retorno



Fuente: Economipedia. (2018). *Tasa interna de retorno*.  
<https://economipedia.com/definiciones/tasa-interna-de-retorno-tir.html>.

## 10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Habiendo obtenido los datos del estudio se procederá a realizar un análisis estadístico de la información para poder predecir algunos comportamientos. Para ello se utilizarán las siguientes herramientas:

- Tablas de datos de desgaste.
- Gráficos de barras del desgaste en el rodete.
- Tablas de datos del desgaste en el rodete.
- Gráficos de barras para ilustrar y comparar los rendimientos energéticos de producción de la energía de las turbinas en distintas condiciones (rodete nuevo, desgastado y reacondicionado).

Las herramientas estadísticas a utilizar serán:

- Análisis de correlación entre variables (desgaste vs. eficiencia energética).
- Medidas de tendencia central: debido a que se reunirán datos, se realizarán los cálculos para determinar la media aritmética y sus desviaciones en cada caso.



## 11. CRONOGRAMA

Figura 10. Cronograma de trabajo

Actividad	Año 2019					
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Fase 1: Exploración bibliográfica	■					
Fase 2: Recolección de datos y casos		■	■	■	■	■
Fase 3: Análisis de datos			■	■	■	■
Fase 4: Elaboración de reporte de resultados					■	■

Fuente: elaboración propia.



## 12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

El presente trabajo de investigación se realizará con recursos propios del estudiante de maestría. Siendo la investigación descriptiva, se tendrán en cuenta los siguientes recursos:

Tabla V. **Recursos necesarios para la investigación**

<b>Recurso</b>	<b>Costo</b>
2 Resmas de hojas	Q 100.00
Viáticos (combustibles, hospedaje y alimentación)	Q2,000.00
Toner de Impresora	Q 500.00
Asesor	Q2,500.00
<b>TOTAL</b>	<b>Q5,100.00</b>

Fuente: elaboración propia.

Siendo los recursos aportados suficientes para la investigación, se considera que es factible la realización del estudio.



### 13. BIBLIOGRAFÍA

1. AGUDELO, S.; CHICA, E.; OBANDO, F.; SIERRA, N.; VELÁSQUEZ, N.; ENRÍQUEZ, W. (2013). *Ingeniería y competitividad*. En: *Ingeniería y competitividad* (Vol. 15, págs. 183-193). Medellín, Colombia: McGraw-Hill.
2. Andritz. (2012). *Manual de operación y mantenimiento para turbina Pelton en Hidroeléctrica El Recreo*. Austria: Farmington Hill.
3. Andritz. (2018). *Turbinas hidráulicas tipo Pelton marca Andritz*. Recuperado de: <<http://www.andritz.com/no-index/pf-detail?productid=9224>>.
4. ARROYAVE, D. E. (2009). *Modelo del comportamiento de presas en cascada y visualización por software*. Guatemala: USAC.
5. CHÁVEZ, I. V. (2013). *Reacondicionamiento de turbina Francis de hidroeléctrica Zunil. Municipalidad de Quetzaltenango*. Tesis de Posgrado. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
6. Comisión General de Energía Eléctrica (CNEE). (2018). *CNEE*. Recuperado de: <[www.cnee.gob.gt](http://www.cnee.gob.gt)>.
7. DELFIN, J. G. (2015). *Turbinas*. EE. UU.: Farmington Hill.

8. Facilities Engineering Branch Engineering Division Denver office Denver, Colorado. (2000). *Turbine Repair, facilities instructions, standards and techniques*. Denver, Colorado, Estados Unidos: Farmington Hill, 2010. 60 p.
9. FARIÑAS, J. E. (2010). *Aspetos específicos de los aprovechamientos minihidroeléctricos. Aplicaciones en Canarias*. Apoyo Audiovisual de Maestría en Energías Renovables. EE. UU.: Farmington Hill.
10. GARCÍA, H. E. (2005). *Controles de calidad en la fabricación de un rodete Pelton*. Lima, Perú: Facultad de Ciencias Físicas EAP de Ingeniería Mecánica de Fluidos.
11. GONZÁLEZ, M. P. (2009). *Máquinas de fluidos*. México: McGraw-Hill.
12. GRAMAJO, R. A. (2009). *Estudio y análisis para la optimización de la planta hidroeléctrica Zunil*. Guatemala: USAC.
13. GUERRERO RAMÍREZ, R. D.; ESTRADA MENDOZA, R. A.; ANTILLÁN LÓPEZ, P. E.; HERNÁNDEZ TORRES, L. E.; VALDÉZ LÓPEZ, L. M. (2016). *Slideplayer*. Recuperado de: <[www.slideplayer.es](http://www.slideplayer.es)>.
14. MARCHEGANI, Ariel. (2004). *Turbinas hidráulicas de acción. Turbinas Pelton*. Argentina: Universidad Nacional del Comahue.
15. MARTÍNEZ, R. C. (2012). *Caracterización de una turbina axial y creación de aplicación gráfica para procesamiento de datos*. España: Universidad de Jaén.

16. OYERVIDE OJEDA, P. M.; HURTADO, C. X. (2004). *Implementación de un procedimiento de inspección y reparación por soldadura de rodetes Pelton en la Central el Molino del Proyecto Hidroeléctrico Paute*. Cuenca, Ecuador: Universidad de Guayaquil.
17. RIVERA GUIROLA, G. R. (2009). *Reacondicionamiento de los alabes directrices de una turbina hidráulica tipo Francis en Hidroeléctrica Los Esclavos y su análisis de costos*. Tesis de Pregrado, Guatemala: USAC.
18. Servicios de Ingeniería, S. L. (24 de 10 de 2018). *Rendimiento de turbinas hidráulicas*. Recuperado de: <[http://www.asing.es/rendimiento\\_turbinas\\_hidraulicas.php](http://www.asing.es/rendimiento_turbinas_hidraulicas.php)>.
19. VALENCIA, J. (2015). *Informe de turbomáquinas, práctica impac jet*. Recuperado de: <[www.blogspot.com](http://www.blogspot.com)>.
20. ZULUAGA, J. D. (2012). *Microturbinas Pelton*. Artículo científico.

