



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

**REDISEÑO DE LA CASA DE MÁQUINAS DE PLANTA HIDROELÉCTRICA CHICHAIC DEL  
INSTITUTO NACIONAL DE ELECTRIFICACIÓN (INDE)**

**Francisco Javier Iboy Ramírez**

Asesorado por el Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda

Guatemala, noviembre de 2020



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**REDISEÑO DE LA CASA DE MÁQUINAS DE PLANTA HIDROELÉCTRICA CHICHAIC DEL  
INSTITUTO NACIONAL DE ELECTRIFICACIÓN (INDE)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**FRANCISCO JAVIER IBOY RAMÍREZ**

ASESORADO POR EL ING. EDWIN ESTUARDO SARCEÑO ZEPEDA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2020



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
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. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda
EXAMINADOR	Ing. Carlos Anibal Chicojay Coloma
EXAMINADOR	Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

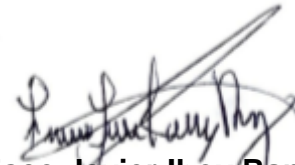


## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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:

### **REDISEÑO DE LA CASA DE MÁQUINAS DE PLANTA HIDROELÉCTRICA CHICHAIC DEL INSTITUTO NACIONAL DE ELECTRIFICACIÓN (INDE)**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 8 de abril de 2019.



**Francisco Javier Iboy Ramírez**







UNIDAD DE EPS

Guatemala, 9 de agosto de 2020  
REF.EPS.DOC.CM.12.08.2020

Ingeniero  
Oscar Argueta Hernández  
Director Unidad de EPS  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Estimado Ing. Argueta Hernández:

Por este medio atentamente le informo que como Asesora-Supervisora de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S.) del estudiante universitario de la Carrera de Ingeniería Mecánica, **Francisco Javier Iboy Ramírez, Registro Académico No. 201314704** procedí a revisar el informe final, cuyo título es: **REDISEÑO DE LA CASA DE MÁQUINAS DE PLANTA HIDROELÉCTRICA CHICHAIC DEL INSTITUTO NACIONAL DE ELECTRIFICACIÓN (INDE).**

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

  
Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda  
Asesora-Supervisora de EPS  
Área de Ingeniería Mecánica Industrial



EESZ/es





UNIDAD DE EPS

Guatemala, 26 de noviembre de 2020  
REF

Ingeniero  
Gilberto Enrique Morales Baiza  
Director de Escuela  
Ingeniería mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Estimado Ing. Morales Baiza:

Por este medio atentamente le informo que procedí a revisar el informe final titulado: **DE LA CASA DE MÁQUINAS DE PLANTA HIDROELÉCTRICA CHICHAIC DEL INSTITUTO NACIONAL DE ELECTRIFICACIÓN (INDE)** del estudiante **Francisco Javier Iboy Ramírez, CUI 2687318020102, Reg. Académico 201314704**

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Ing. Esdras Miranda Orozco  
COLEGIADO 4837

Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco  
**Área Térmica**  
**Escuela de Ingeniería Mecánica.**





Guatemala, 10 de agosto de 2020  
REF.EPS. D.19.08.2020

Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza  
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Estimado Ingeniero Morales Baiza:

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **REDISEÑO DE LA CASA DE MÁQUINAS DE PLANTA HIDROELÉCTRICA CHICHAIC DEL INSTITUTO NACIONAL DE ELECTRIFICACIÓN (INDE)**, que fue desarrollado por el estudiante universitario **Francisco Javier Iboy Ramírez** quien se identifica con **CUI 2687 31802 0102 y Registro Académico 201314704**, quien fue debidamente asesorado y supervisado por el Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación por parte del Asesor-Supervisor, como director apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Oscar Argueta Hernández', written over a faint circular stamp or watermark.

Ing. Oscar Argueta Hernández  
Director Unidad de EPS

OAH





**USAC**

TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala


Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.EIM.115.2020

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor-Supervisor y del Director de la Unidad de EPS, al trabajo de graduación titulado: **REDISEÑO DE LA CASA DE MÁQUINAS DE PLANTA HIDROELÉCTRICA CHICHAIC DEL INSTITUTO NACIONAL DE ELECTRIFICACIÓN (INDE)** del estudiante **Francisco Javier Iboy Ramírez, CUI 2687318020102**, Reg. Académico **201314704** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

***“Id y Enseñad a Todos”***

  
Vo.Bo. Ing.



Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza  
Director  
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, agosto de 2020

/aej





DTG. 428.2020.

La Decana 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: **REDISEÑO DE LA CASA DE MÁQUINAS DE PLANTA HIDROELÉCTRICA CHICHAIC DEL INSTITUTO NACIONAL DE ELECTRIFICACIÓN (INDE)**, presentado por el estudiante universitario: **Francisco Javier Iboy Ramírez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
DECANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
★

Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana

Guatemala, noviembre de 2020

AACE/asga



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por haberme permitido llegar a este punto y darme las oportunidades y sabiduría para culminar mi carrera universitaria.
- Mis padres** Elsa Ramirez y Rudi Iboy. Por su apoyo incondicional, por su paciencia y amor.
- Mi novia** Alexandra Flores. Por su amor, apoyo y ser la inspiración más grande en mi vida.
- Mis hermanos** Eduardo y Pablo Iboy. Por su apoyo y ser parte fundamental de mi vida.
- Mi amigo** Edin Orozco. Por su amistad y apoyo durante mi formación académica y en la vida diaria.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Entidad que me brindó todas las herramientas y conocimiento para desarrollarme profesionalmente.
<b>Instituto Nacional de Electrificación (INDE)</b>	Por darme la oportunidad de desarrollar mi trabajo de graduación.
<b>Ing. Huber Rodríguez</b>	Por su apoyo e interés profesional a lo largo de la realización de este trabajo de graduación.
<b>Ing. Daniel Figueroa</b>	Por la ayuda y conocimiento brindando a lo largo de todo el ejercicio profesional supervisado.
<b>Mis amigos</b>	Eduardo Estrada, José Acevedo y Carlos Peralta por su amistad y apoyo, tanto en lo académico como en lo personal.









## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS .....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Descripción de la empresa .....	1
1.1.1. Ubicación .....	1
1.1.2. Historia.....	2
1.1.3. Misión .....	3
1.1.4. Visión.....	3
1.1.5. Organigrama.....	4
1.2. Descripción del problema .....	5
1.3. Definiciones básicas .....	7
2. FASE DE INVESTIGACIÓN .....	9
2.1. Análisis del subsuelo e hidrología de la hidroeléctrica .....	9
2.1.1. Geología .....	9
2.1.2. Hidrología .....	10
2.1.3. Sismología .....	12
2.2. Evaluación de los componentes de la hidroeléctrica.....	13
2.2.1. Embalse.....	14
2.2.2. Presa .....	15

2.2.3.	Desarenador.....	19
2.2.4.	Canal.....	22
2.2.5.	Canal de conducción .....	24
2.2.6.	Embalse de captación .....	25
2.2.7.	Tubería forzada .....	27
2.2.8.	Válvula .....	28
2.3.	Turbinas Francis .....	30
2.3.1.	Partes de la turbina Francis.....	31
2.3.2.	Sistema de enfriamiento .....	36
2.3.3.	Mantenimiento .....	37
2.4.	Generadores .....	38
2.4.1.	Partes del generador .....	39
2.4.2.	Sistema de enfriamiento .....	41
2.4.3.	Mantenimiento .....	41
2.5.	Instrumentación de la hidroeléctrica .....	42
2.6.	Causa del bajo rendimiento en la generación de la hidroeléctrica.....	45
2.7.	Características de la hidroeléctrica.....	48
2.8.	Clasificación de la hidroeléctrica .....	56
2.9.	Demanda energética de la región.....	57
3.	SERVICIO TÉCNICO PROFESIONAL .....	63
3.1.	Cálculo del potencial hidrológico .....	63
3.2.	Propuesta de rediseño .....	67
3.3.	Cotización del rediseño .....	82
3.4.	Análisis costo-beneficio.....	85
4.	FASE DE DOCENCIA.....	89
4.1.	Condiciones de trabajo de equipo e instrumentación .....	89

4.2.	Manual de monitoreo .....	90
4.3.	Ruta de monitoreo .....	91
4.4.	Capacitación.....	92
CONCLUSIONES .....		93
RECOMENDACIONES.....		95
BIBLIOGRAFÍA.....		97
APÉNDICES.....		101
ANEXO.....		121



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Ubicación hidroeléctrica Chichaic.....	2
2.	Organigrama del INDE .....	4
3.	Embalse de hidroeléctrica Chichaic 1.....	14
4.	Embalse de hidroeléctrica Chichaic 2.....	15
5.	Sección transversal de la presa de Chichaic .....	16
6.	Presa hidroeléctrica Chichaic.....	17
7.	Compuerta de canal de conducción .....	18
8.	Mecanismo compuerta de canal de conducción .....	19
9.	Mecanismo compuerta de descarga de fondo.....	19
10.	Desarenador hidroeléctrica Chichaic.....	20
11.	Fuga compuerta canal del desarenador .....	21
12.	Compuerta del desarenador.....	21
13.	Canal hidroeléctrica Chichaic.....	22
14.	Reforzamiento en los cimientos del canal .....	23
15.	Tensores en tramos del canal .....	24
16.	Canal de conducción hidroeléctrica Chichaic .....	25
17.	Embalse de captación hidroeléctrica Chichaic .....	26
18.	Esquema hidroeléctrica Chichaic .....	27
19.	Tubería de presión hidroeléctrica Chichaic.....	28
20.	Válvula actual hidroeléctrica Chichaic .....	29
21.	Válvula nueva hidroeléctrica Chichaic .....	30
22.	Cámara espiral turbina Francis .....	31
23.	Distribuidor de turbina Francis.....	32

24.	Prueba distribuidor turbina Francis .....	33
25.	Rodete turbina Francis .....	34
26.	Tubos de aspiración turbina Francis .....	35
27.	Regulador de velocidades turbina Francis .....	35
28.	Volante de inercia turbina Francis.....	36
29.	Sistema de enfriamiento .....	37
30.	Placa del generador de la hidroeléctrica .....	39
31.	Generador, hidroeléctrica Chichaic.....	40
32.	Escobillas, generador, hidroeléctrica Chichaic.....	41
33.	Mantenimiento al generador .....	42
34.	Instrumentación turbina Francis 1 .....	43
35.	Instrumentación turbina Francis 2 .....	43
36.	Nivel de aceite, chumaceras de la turbina .....	44
37.	Nivel de aceite, regulador de velocidades.....	44
38.	Termómetro, chumaceras del eje de la turbina .....	45
39.	Gráfica de historial de generación .....	56
40.	Gráfica tipo de alumbrado.....	58
41.	Selección del tipo de turbina según caudal y salto.....	68
42.	Selección de rodete radio axial .....	70
43.	Rodete radio axial.....	71
44.	Dimensiones para el rodete .....	73
45.	Rediseño del rodete.....	75
46.	Dimensiones para la carcasa.....	76
47.	Rediseño de la carcasa .....	78
48.	Dimensiones para el tubo de aspiración .....	79
49.	Rediseño para el tubo de aspiración.....	82
50.	Portada manual de monitoreo.....	90
51.	Ruta de monitoreo .....	90

## TABLAS

I.	Características físicas y químicas del río Cahabón .....	10
II.	Caudales medios del río Cahabón en 2018 para la generación de energía.....	11
III.	Historial de caudales promedio del río Cahabón para generación.....	12
IV.	Datos turbina Francis .....	31
V.	Datos de los generadores .....	38
VI.	Generación mensual año 2018 .....	48
VII.	Generación mensual año 2018 y proyección.....	52
VIII.	Generación anual año 2018 y proyección .....	53
IX.	Generación anual e ingresos por generación año 2018 .....	54
X.	Generación e ingresos proyectados por generación año 2018.....	54
XI.	Ingresos del año 2018 e ingresos proyectados .....	55
XII.	Consumo de energía por hogar.....	58
XIII.	Demanda energética de la región .....	59
XIV.	Generación mensual hidroeléctrica Chichaic.....	60
XV.	Demandas energéticas .....	61
XVI.	Caudales promedio obtenidos durante los últimos 23 años utilizados para la generación.....	64
XVII.	Generación anual con rediseño de la hidroeléctrica .....	66
XVIII.	Capacidad de generación anual.....	66
XIX.	Velocidades síncronas y velocidad específica.....	69
XX.	Dimensiones de rediseño para el rodete .....	74
XXI.	Ecuaciones para el dimensionamiento de la carcasa .....	75
XXII.	Solución de ecuaciones para el dimensionamiento de la carcasa .....	77
XXIII.	Dimensiones de rediseño para la carcasa.....	77
XXIV.	Ecuaciones para el dimensionamiento del tubo de aspiración .....	79

XXV.	Solución de ecuaciones para el dimensionamiento del tubo de aspiración.....	80
XXVI.	Dimensiones de rediseño para la tubería de aspiración.....	81
XXVII.	Cotización turbinas y generadores.....	84
XXVIII.	Caudal promedio para generación de energía .....	85
XXIX.	Precio por megavatio hora generado últimos 5 años .....	87
XXX.	Rangos de operación turbinas Francis.....	89



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>A</b>	Amperios
<b>Hp</b>	Caballos de fuerza
<b>Q</b>	Caudal
<b>\$</b>	Dólares
<b>Hz</b>	Frecuencia
<b>°C</b>	Grados centígrados
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	Kilogramo sobre centímetro cuadrado
<b>km</b>	Kilometro
<b>km<sup>2</sup></b>	Kilómetro cuadrado
<b>kVA</b>	Kilovatio amperio
<b>kV</b>	kilovatio
<b>MV</b>	Megavatio
<b>MVh</b>	Megavatio hora
<b>m</b>	Metro
<b>m<sup>2</sup></b>	Metro cuadrado
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cúbico
<b>m<sup>3</sup>/s</b>	Metro cúbico sobre segundo
<b>mg/L</b>	Miligramo por litro
<b>%</b>	Porcentaje
<b>Q</b>	Quetzales
<b>rpm</b>	Revoluciones por minuto



## GLOSARIO

<b>Álabes</b>	Paleta curva, cuya función es regular el flujo de agua que entra a la turbina.
<b>Babbit</b>	Aleación utilizada para la superficie de apoyo en un cojinete de fricción.
<b>Canal</b>	Construcción destinada al transporte de fluidos, generalmente utilizada para agua, y que, a diferencia de las tuberías, es abierta a la atmósfera.
<b>Cauce</b>	Concavidad del terreno, natural o artificial, por donde corre un río, un canal o cualquier corriente de agua.
<b>Caudal</b>	Cantidad de fluido que circula a través de una sección del ducto (tubería, río, canal) por unidad de tiempo.
<b>Chumacera</b>	Pieza de metal con una muesca en que descansa y gira cualquier eje de maquinaria.
<b>Desbalance</b>	Distribución desigual de peso en un cuerpo, con respecto de su eje de rotación. Los ejes de inercia y rotación no coinciden y se producen vibraciones.
<b>Eje</b>	Barra cilíndrica que atraviesa un cuerpo giratorio y le sirve como centro para girar.

<b>Erosión</b>	Proceso de pérdida de material, provocado por la incidencia de partículas sólidas sobre una superficie.
<b>Generador</b>	Dispositivo capaz de transformar la energía mecánica en eléctrica.
<b>Geología</b>	Ciencia que estudia el origen, formación y evolución de la Tierra, los materiales que la componen y su estructura.
<b>Hidráulica</b>	Parte de la mecánica que estudia el equilibrio y el movimiento de los fluidos. Técnica de conducir, contener, elevar y aprovechar las aguas.
<b>Hidroeléctrica</b>	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 y fuerza motriz.
<b>Hidrología</b>	Rama de las ciencias de la Tierra que estudia el agua, su ocurrencia, distribución, circulación, y propiedades físicas, químicas y mecánicas en los océanos, atmósfera y superficie terrestre.
<b>Instrumentación</b>	Grupo de elementos que sirven para medir, convertir, transmitir, controlar o registrar variables de un proceso.

<b>Mantenimiento</b>	Actividades dirigidas a prever y asegurar el funcionamiento normal, la eficiencia y la buena apariencia de los equipos.
<b>Mecanismos</b>	Dispositivos o conjuntos de sólidos resistentes que reciben una energía de entrada y, a través de un sistema de transmisión y transformación de movimientos, realizan un trabajo.
<b>Potencia</b>	Cantidad de trabajo efectuado por unidad de tiempo.
<b>Presión</b>	Fuerza que ejerce un gas, un líquido o un sólido sobre una superficie.
<b>Salto de agua</b>	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.
<b>Sedimentación</b>	Proceso que ocurre cuando material sólido es transportado por corrientes de agua y se depositan en el fondo de un embalse, canal o río, disminuyendo la capacidad para captar agua.
<b>Sismología</b>	Rama de la geofísica que se encarga del estudio de terremotos y la propagación de las ondas elásticas que se generan en el interior y la superficie de la Tierra, asimismo que de las placas tectónicas.

<b>Transformador</b>	Elemento eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la potencia.
<b>Turbina Francis</b>	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.
<b>Válvula</b>	Dispositivo mecánico con el cual se puede iniciar, detener o regular la circulación de líquidos o gases mediante una pieza movable que abre, cierra u obstruye en forma parcial uno o más orificios o conductos.
<b>Vibración</b>	Oscilación perceptible y medible en la superficie de las máquinas que ocurre como consecuencia de fuerzas dinámicas que excitan el movimiento oscilatorio.

## RESUMEN

El presente trabajo de graduación se llevó a cabo en la hidroeléctrica Chichaic, ubicada en el departamento de Alta Verapaz y propiedad del INDE, el cual tiene como objetivo realizar una propuesta para aumentar la generación de energía eléctrica por medio del rediseño de sus turbinas Francis. Actualmente la hidroeléctrica no alcanza los valores de generación de energía para la que fue diseñada, problema que se atribuye a las turbinas instaladas. El proyecto se llevó a cabo en tres fases: fase de investigación, servicio técnico profesional y fase de capacitación.

La primera fase se centra en determinar el origen de los problemas de las turbinas Francis, evaluando cada uno de los elementos que conforman la hidroeléctrica y, a su vez, demostrar que es necesario llevar a cabo un rediseño de está realizando proyecciones que ayuden a justificar esa decisión.

La segunda fase está orientada al rediseño de las turbinas Francis, realizando cálculos para determinar las dimensiones y capacidad de los equipos idóneos para la hidroeléctrica.

Por último, en la fase de capacitación se hace énfasis en establecer la aplicación de inspección VOSO para monitoreo de las turbinas Francis, una técnica de fácil aplicación para los operadores reforzando la capacitación con un manual que explica cómo aplicar dicha técnica.





# OBJETIVOS

## General

Proponer un rediseño para las turbinas Francis de la hidroeléctrica Chichaic con el fin de aprovechar de manera eficiente el recurso hídrico y proveer más energía para el desarrollo del país.

## Específicos

1. Identificar las características del río Cahabón y subsuelo donde está ubicada la hidroeléctrica para obtener información sobre el recurso hídrico y calidad de este.
2. Evaluar cada elemento de la hidroeléctrica para determinar el estado actual de todos los componentes de la hidroeléctrica y el origen de la deficiencia en generación de energía.
3. Demostrar que no se está aprovechando el recurso hídrico con el que se cuenta y que es necesario llevar a cabo el rediseño.
4. Establecer las dimensiones y capacidades de los equipos adecuados para las características hídricas y el salto de la hidroeléctrica.
5. Demostrar que la propuesta de rediseño es rentable.

6. Establecer un método de mantenimiento predictivo para identificar potenciales deficiencias mediante un personal capacitado.

## INTRODUCCIÓN

La hidroeléctrica Chichaic es una central hidroeléctrica catalogada como de pequeña potencia debido a su capacidad de generación de energía, está ubicada en Cobán, Alta Verapaz, una región que se caracteriza por sus extensos y fluyentes ríos, por lo cual, en esta zona se pueden encontrar distintas hidroeléctricas de diferentes capacidades.

La hidroeléctrica Chichaic es una de las pioneras de la región, cuenta con más de 40 años de operación y actualmente se ha visto un deficiente funcionamiento a la hora de generar energía. Su capacidad de generación está por debajo de su capacidad de diseño, siendo la principal causa las dos turbinas Francis instaladas. Estas turbinas superan los 50 años desde su fabricación por lo que sus componentes han sufrido desgastes a lo largo de los años y han sido restaurados.

Hasta hace unos años atrás la hidroeléctrica mantenía una capacidad de generación promedio anual de 3 000 MWh-, pero actualmente se ha visto interrumpida y ha descendido a menos de 2 000 MWh en los últimos dos años, valores nunca vistos por la hidroeléctrica. Por esta razón se tiene previsto buscar una propuesta de rediseño la cual pueda solucionar esta deficiencia en la generación.

De esta manera nace la necesidad de este trabajo de graduación para buscar la alternativa más adecuada y rentable que pueda solventar los problemas actuales de esta longeva hidroeléctrica.



# **1. GENERALIDADES**

## **1.1. Descripción de la empresa**

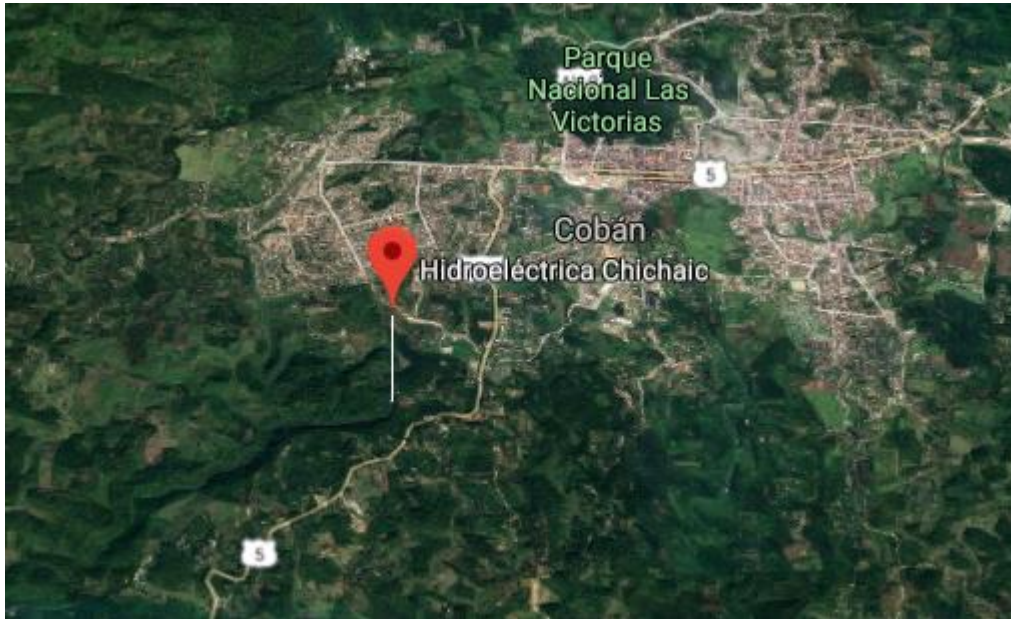
El Instituto Nacional de Electrificación INDE es una entidad estatal, autónoma y descentralizada, la cual goza de autonomía funcional, patrimonio propio, personalidad jurídica y plena capacidad para adquirir derechos y contraer obligaciones en materia de su competencia. Cuenta con varias sedes ubicadas en distintos departamentos del país, las cuales están a cargo de los diferentes proyectos que generan energía eléctrica.

El INDE cuenta con diferentes hidroeléctricas en el país, siendo la hidroeléctrica Chichaic la principal fuente de estudio para este trabajo de graduación.

### **1.1.1. Ubicación**

La hidroeléctrica Chichaic se encuentra ubicada en el departamento de Alta Verapaz, en las cercanías del cauce del río Cahabón, en la ruta CA-14 que conduce a la cabecera departamental de Cobán a la altura del kilómetro 208,3. En la figura 1, se puede apreciar su ubicación.

Figura 1. **Ubicación hidroeléctrica Chichaic**



Fuente: Google maps. *Ubicación.* <https://goo.gl/maps/NkXkBJLo2CaBK1qA7>.  
Consulta:12/04/2019

### **1.1.2. Historia**

El 27 de mayo de 1959 el Congreso de la República por medio del decreto 1287 aprueba la Ley Orgánica del Instituto Nacional de Electrificación INDE. En el cual se crea la institución y se regula sus objetivos, fines y obligaciones, estructura administrativa, régimen y recursos económicos, derechos del instituto, disposiciones judiciales, transitorias y derogatorias.

Desde entonces el INDE se ha dedicado a generar energía en el país, proyectándose como la institución con más función social, al tener programas de alto impacto para la población guatemalteca. Siendo estos un plan de electrificación rural y un plan de reforestación.

En cuanto a la hidroeléctrica Chichaic, se construyó en 1958 por medio del cuerpo de ingenieros del ejército y se utilizaba para suministrar energía al casco urbano municipal de Cobán. Pero en 1979 la municipalidad de Cobán traslada la hidroeléctrica al INDE y desde entonces ha pertenecido a la institución.

### **1.1.3. Misión**

Proveer energía para el desarrollo del país contribuyendo a mejorar la calidad de vida de sus habitantes.

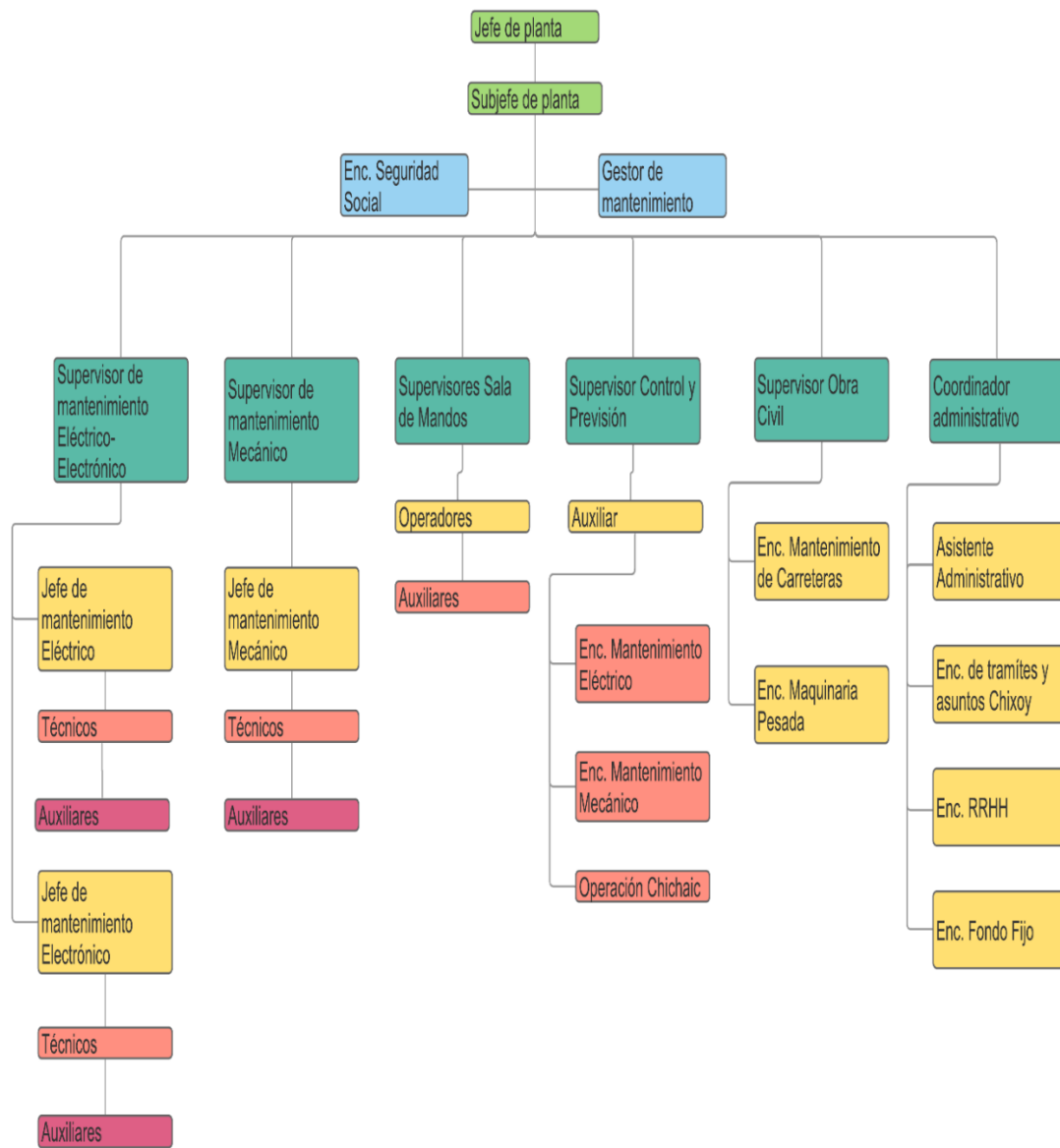
### **1.1.4. Visión**

En 2023 alcanzaremos el 34 % de la producción nacional de energía eléctrica y mantendremos el liderazgo en la transmisión y transformación del Sistema Nacional Interconectado para posicionarnos competitivamente en el Mercado Eléctrico Nacional y Regional.

### 1.1.5. Organigrama

La empresa tiene la siguiente estructura:

Figura 2. Organigrama del INDE



Fuente: elaboración propia.



## **1.2. Descripción del problema**

Hidroeléctrica Chichaic, es una planta hidroeléctrica la cual toma el agua del río Cahabón para generar energía por medio de dos turbinas Francis de eje horizontal con sus respectivos generadores, con más 40 años de actividad ha suministrado energía a la subestación El Peaje, ubicada a un kilómetro de la hidroeléctrica, en donde se distribuye la energía al municipio de Cobán. Por lo que es de vital importancia mantener en funcionamiento la hidroeléctrica y generar energía de la manera más eficiente posible.

- **Antecedentes**

La hidroeléctrica está en operación desde 1979 y a lo largo de ese periodo se ha logrado conservar los equipos en el mejor estado posible, actualmente no tiene el rendimiento esperado por lo cual se pretende cambiarlos o buscar la manera de que mejoren su desempeño. No se tienen los datos originales de diseño de la hidroeléctrica, debido a que la hidroeléctrica se diseñó y se construyó con ayuda del cuerpo de ingenieros del ejército y era propiedad de la municipalidad de Cobán, hasta que se realizó el trámite correspondiente y la hidroeléctrica paso a ser propiedad del Instituto Nacional de Electrificación.

- **Justificación**

Teniendo en cuenta el gran potencial hidrológico para generar energía limpia a través de pequeñas centrales hidroeléctricas en el país, según estudios previstos por el Instituto Nacional de Electrificación, es necesario aprovechar esta alternativa ya que reduciría la demanda de generación de energía por medio de combustibles fósiles derivados del petróleo y se daría paso a nuevas formas de

generar energía priorizando alternativas que opten por el uso de recursos renovables.

Tomando en cuenta la importancia que representan las hidroeléctricas y la generación de energía para el país, es importante hacer que la hidroeléctrica Chichaic trabaje de manera eficiente aprovechando los recursos que tiene a su disposición para contribuir al desarrollo de país.

- Formulación y delimitación del problema

El problema principal es el bajo rendimiento que tiene la hidroeléctrica a la hora de producir energía, anteriormente la planta generaba alrededor de 750 kW por medio de dos turbinas Francis con sus respectivos generadores, actualmente está generando por debajo de 400 kW, y las turbinas están presentando distintas fallas que han ocasionado el paro de estas, dejándolas fuera de operación por más de un mes en el último año, por lo que el desarrollo del ejercicio profesional supervisado, será enfocado en proponer un rediseño de turbinas que sean las adecuadas para la hidroeléctrica.

- Alcances

Con la propuesta de rediseño para la casa de máquinas de la hidroeléctrica Chichaic realizada durante el ejercicio profesional supervisado se tendrá una alternativa para la mejora en la generación de energía. Cabe destacar que esta propuesta está orientada únicamente a las turbinas Francis que se encuentra en la casa de máquinas. En cuanto a si se llevará a cabo el proyecto queda a disposición del Instituto Nacional de Electrificación ya que el costo de la inversión inicial es elevado.

### **1.3. Definiciones básicas**

A continuación, se presenta una descripción breve y concreta de los tecnicismos utilizados en la fase de investigación.

Capacidad instalada: nivel máximo de producción, o transformación, o transmisión. que por diseño puede llegar a tener una instalación con base a equipos e instalaciones físicas.

Cuenca: territorio drenado por un único sistema de drenaje natural, es decir, que drena sus aguas al mar o a un lago corriendo a través de un único río.

Sismicidad: medida de la actividad sísmica de algún lugar específico, según su frecuencia e intensidad a lo largo del tiempo.

Subsuelo: parte de terreno que está por debajo de la superficie terrestre.

Topografía: técnica que consiste en describir y representar en un plano la superficie o el relieve de un terreno.



## **2. FASE DE INVESTIGACIÓN**

El bajo rendimiento en la generación de energía se debe a erosión en los rodets de las turbinas Francis, para corregir este problema es necesario determinar la causa de esto, por esta razón la fase de investigación está orientada a encontrar la causa de la erosión en los rodets de las turbinas Francis y buscar otros factores que puedan estar afectando la producción de energía.

### **2.1. Análisis del subsuelo e hidrología de la hidroeléctrica**

Para determinar la causa de la erosión de los rodets de la hidroeléctrica Chichaic es necesario realizar un diagnóstico de todos los elementos que la componen, iniciando con el subsuelo e hidrología donde se localiza, esto con la finalidad de obtener las características del lugar y determinar la capacidad hídrica para la generación de energía.

#### **2.1.1. Geología**

El subsuelo donde se localiza la hidroeléctrica está compuesto principalmente por roca caliza, según un informe técnico realizado por una empresa contratada por el INDE. La roca caliza es un material que a lo largo de los años se ha utilizado para la construcción debido a su resistencia a la compresión y está compuesta principalmente por calcio, lo que da un indicio de presencia de este elemento químico en el agua que se utiliza para la generación de energía.

### 2.1.2. Hidrología

El agua que se utiliza en la generación de energía proviene del río Cahabón, el cual hace su recorrido por varios municipios y comunidades, y en diversas ocasiones lo utilizan para lavar ropa o de drenaje. Actualmente presenta estas características.

Tabla I. **Características físicas y químicas del río Cahabón**

<b>Característica</b>	<b>Concentración de muestra (mg/L)</b>
Sólidos totales disueltos	199,00
Contenido de calcio	54,69
Contenido de magnesio	16,40
Dureza total	152,62
Clasificación del agua	Dura

Fuente: INSIVUMEH.

El río Cahabón es uno de los que tienen mayor concentración de calcio y magnesio en el país, clasificándose como río de agua dura por la presencia de estos minerales. Además, por la cantidad elevada de sólidos totales disueltos se puede determinar que el agua está compuesta con sustancias inorgánicas y orgánicas.

#### Análisis de caudales

En 2018 se utilizaron los siguientes caudales provenientes del río Cahabón para la generación de energía en la hidroeléctrica Chichaic.

Tabla II. **Caudales medios del río Cahabón en 2018 para la generación de energía**

<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Q medio m<sup>3</sup>/s</b>
2018	Enero	7,38
	Febrero	7,40
	Marzo	4,77
	Abril	4,04
	Mayo	4,23
	Junio	7,95
	Julio	6,85
	Agosto	4,88
	Septiembre	6,33
	Octubre	9,26
	Noviembre	5,79
	Diciembre	3,59

Fuente: INDE.

Hay que tener en cuenta que Guatemala se ve afectada por dos fenómenos mundiales los cuales alteran los patrones de lluvia y por ende la disponibilidad del agua. Estos fenómenos son conocidos como “El Niño” y “La Niña”. Al fenómeno del Niño se le atribuyen la disminución de lluvias que incluso pueden generar sequias en el país, caso contrario sucede con “La Niña”, a este se le atribuyen lluvias excesivas.

Cabe destacar que estos fenómenos funcionan de maneras diferentes dependiendo de la región, no se comportan de igual manera que en Centroamérica como en Sudamérica. En cuanto a la frecuencia de aparición de estos fenómenos no contemplan un patrón por lo que es difícil su predicción.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores para estimar valores de caudales promedios mensuales es necesario tomar en cuenta registros de

caudales de años anteriores. La siguiente tabla muestra los caudales promedios estimados en la presa.

Tabla III. **Historial de caudales promedio del río Cahabón para generación**

<b>Mes</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>
Enero	5,24
Febrero	4,35
Marzo	3,62
Abril	2,50
Mayo	2,66
Junio	5,54
Julio	6,77
Agosto	8,18
Septiembre	9,78
Octubre	10,51
Noviembre	8,29
Diciembre	6,96

Fuente: INDE.

La tabla anterior muestra el promedio de caudales registrados a lo largo de 23 años para la hidroeléctrica, como se puede observar la hidroeléctrica tiene capacidad para trabajar alrededor de 9 meses al año, donde presenta valores de caudal aceptables para la generación, a excepción de los meses de marzo, abril y mayo, que usualmente se designan para mantenimientos mayores debido a la escasez de agua.

### **2.1.3. Sismología**

El área donde se encuentra ubicada la hidroeléctrica Chichaic tiene una actividad sísmica bastante alta, según AGIES (Asociación Guatemalteca de



Ingeniería Estructural y Sísmica). Por lo que toda obra civil que comprende la hidroeléctrica está diseñada para soportar sismos.

Con este breve análisis se obtuvieron las características principales del subsuelo e hidrología que rodean a la hidroeléctrica, las cuales se interpretan de la siguiente manera:

**Geología:** el terreno donde se ubica la hidroeléctrica es estable para realizar adecuaciones civiles, ya que gran parte de este está compuesto por roca caliza. La geología del terreno es la principal causa de calcio en el agua, actualmente no existe un estudio sobre el impacto de aguas duras en turbinas hidráulicas, pero el uso de aguas duras a elevadas temperaturas puede ocasionar daño a los componentes metálicos.

**Hidrología:** la hidroeléctrica cuenta con caudales aceptables para la generación casi todo el año, por lo que teóricamente debería de generarse más energía. En cuanto a sus características físicas posee gran cantidad de sólidos totales disueltos, lo cual puede provocar erosión a los componentes internos de las turbinas.

**Sismología:** la hidroeléctrica al estar ubicada en una zona con bastante sismicidad, al momento de realizar obras civiles se debe tomar en cuenta que deben soportar sismos.

## **2.2. Evaluación de los componentes de la hidroeléctrica**

Como se mencionó anteriormente la baja generación se debe a los rodets de las turbinas, pero es necesario realizar un diagnóstico a cada uno de los

elementos que componen la hidroeléctrica para determinar la causa de esto y encontrar otros posibles fallos que estén afectando la generación de energía.

### **2.2.1. Embalse**

El embalse tiene una capacidad aproximada de 36 000 m<sup>3</sup> de agua, en el cual se puede observar la presencia de plantas sobre la superficie del río y animales que habitan la región. Todos los años recibe mantenimiento para limpiar la sedimentación que acarrea el río a lo largo de su cauce natural. De esta manera se logra mantener el volumen de agua captado en el embalse.

**Figura 3. Embalse de hidroeléctrica Chichaic 1**



Fuente: INDE.

Figura 4. **Embalse de hidroeléctrica Chichaic 2**

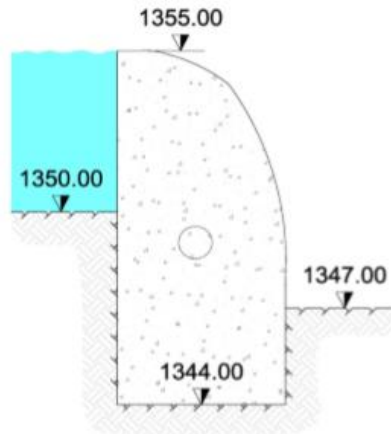


Fuente: INDE.

### **2.2.2. Presa**

La presa de la hidroeléctrica Chichaic está ubicada a 1 750 metros aguas arriba de la casa de máquinas, mide 40 metros de longitud e inicialmente tenía una altura de 5 metros sobre el nivel del embalse como se muestra en la figura 4, pero por causa de la sedimentación en el embalse se tomó la decisión de aumentar la altura de la presa 60 centímetros más, para no perder la capacidad del embalse.

Figura 5. **Sección transversal de la presa de Chichaic**



Fuente: Estudio de seguridad de presas, INDE.

La presa es de gravedad, es decir, resiste toda la carga hidráulica por su propio peso y está hecha de concreto. Actualmente, la presa luce como la figura 5, se ha alterado su geometría provocando que el agua que sobrepasa el nivel de la presa golpee en la sección parabólica de la misma produciendo un desgaste leve sobre su superficie.

Figura 6. **Presa hidroeléctrica Chichaic**



Fuente: INDE.

La presa cuenta con dos compuertas, la del canal de conducción y la de descarga de fondo, ambas se operan por medio de un mecanismo de tornillo sinfín y están ubicadas en el puente metálico sobre la presa.

La compuerta del canal de conducción tiene un ancho y una altura de 2,50 metros y se utiliza para ajustar el caudal a lo largo del canal, la apertura al 100 % de esta depende del estado del embalse, actualmente se mantiene a la mitad a 1,25 metros puesto que debido a la erosión de los rodetes no es posible utilizar toda la carga disponible puesto que se generan vibraciones dentro de las turbinas. Esta compuerta presenta una fuga sobre la parte superior lo cual provoca un efecto de cascada que desgasta levemente el canal y produce turbulencia al inicio de este. Utiliza un mecanismo de cremallera para su operación.

Figura 7. **Compuerta de canal de conducción**



Fuente: INDE.

La compuerta de descarga de fondo tiene las siguientes dimensiones: 1,50 metros de altura y 1,20 metros de ancho. Se utiliza para liberar el agua del embalse para hacer mantenimiento o para liberar agua del embalse en casos de emergencia. Esta compuerta se manipula por medio de una cremallera y una caja reductora de presión.

No fue posible tomarle una fotografía a la compuerta de descarga debido a que el embalse se encontraba lleno, pero se puede determinar que está en buenas condiciones ya que el embalse mantiene su volumen, de existir una fuga en esta compuerta se notaría una disminución en la altura de agua del embalse.

Figura 8. **Mecanismo compuerta de canal de conducción**



Fuente: INDE.

Figura 9. **Mecanismo compuerta de descarga de fondo**



Fuente: INDE.

### **2.2.3. Desarenador**

El agua proveniente de la presa hace un pequeño recorrido sobre el canal hasta llegar al desarenador. Este es el encargado de limpiar el agua antes de que llegue a casa de máquinas. El desarenador es una cámara ancha a un lado del canal, en la cual se reduce el caudal proveniente de la presa, con el objetivo de sedimentar cualquier impureza en el agua y derivar agua limpia hacia el canal.

Figura 10. **Desarenador hidroeléctrica Chichaic**



Fuente: INDE.

El desarenador tiene tres compuertas una del canal, una de operación y una de limpieza de fondo. La compuerta del canal presenta una fuga en la parte superior, lo cual provoca que gran parte del caudal no pase por el desarenador, si no, siga sobre el canal hacia la casa de máquinas. Actualmente los mecanismos de operación de las compuertas están en buen estado y son funcionales.



Figura 11. **Fuga compuerta canal del desarenador**



Fuente: INDE.

Figura 12. **Compuerta del desarenador**



Fuente: INDE.

#### **2.2.4. Canal**

El canal inicia en la cota 0, salida de la presa, hasta la cota 750, metros después del desarenador. El canal es de concreto, ha sido reforzado en varias ocasiones y tiene tensores, debido a que ha presentado varios desplazamientos y en algunos tramos ha intentado abrirse. El canal funciona perfectamente y no tiene presencia de fugas. Las dimensiones del canal son de 1,60 metros de alto y 2,30 metros de ancho.

**Figura 13. Canal hidroeléctrica Chichaic**



Fuente: INDE.

Como se mencionó anteriormente el canal ha tenido que ser reforzado por que en algunos tramos ha intentado abrirse y en otros se ha desplazado de los cimientos, esto debido a la presión que ejerce el agua en las paredes del canal. Para evitar esto se han hecho nuevos cimientos de concreto como en la figura 13, que ayuden a mantener estable el canal y en los tramos donde se ha intentado abrir se tensó por medio de un cable conectado a los cimientos de ambos lados como en la figura 14.

**Figura 14. Reforzamiento en los cimientos del canal**



Fuente: INDE.

Figura 15. **Tensores en tramos del canal**



Fuente: INDE.

### **2.2.5. Canal de conducción**

El canal de conducción es de concreto y tiene las mismas dimensiones que el tramo anterior, 1,60 metros de alto y 2,30 metros de ancho. Este canal hace referencia al tramo desde la cota 750, donde el canal empieza a separarse del suelo para seguir su trayectoria hacia el embalse de captación, ganando una altura de 20 metros debido a la geografía del terreno.

Este canal es de difícil acceso ya que se encuentra suspendido en gran parte del recorrido y dificultad las reparaciones de este. Actualmente está en buen estado y no presenta fugas, ha sufrido rompimientos debido a la colisión de árboles contra la estructura.

Figura 16. **Canal de conducción hidroeléctrica Chichaic**



Fuente: INDE.

### **2.2.6. Embalse de captación**

El embalse de captación o cámara de carga es un depósito que se localiza en la ladera de la montaña, aproximadamente a 19 metros de altura sobre la casa de máquinas. En este se capta toda el agua procedente del canal, tiene una capacidad de 670 m<sup>3</sup> y en su parte inferior da inicio la tubería de presión.

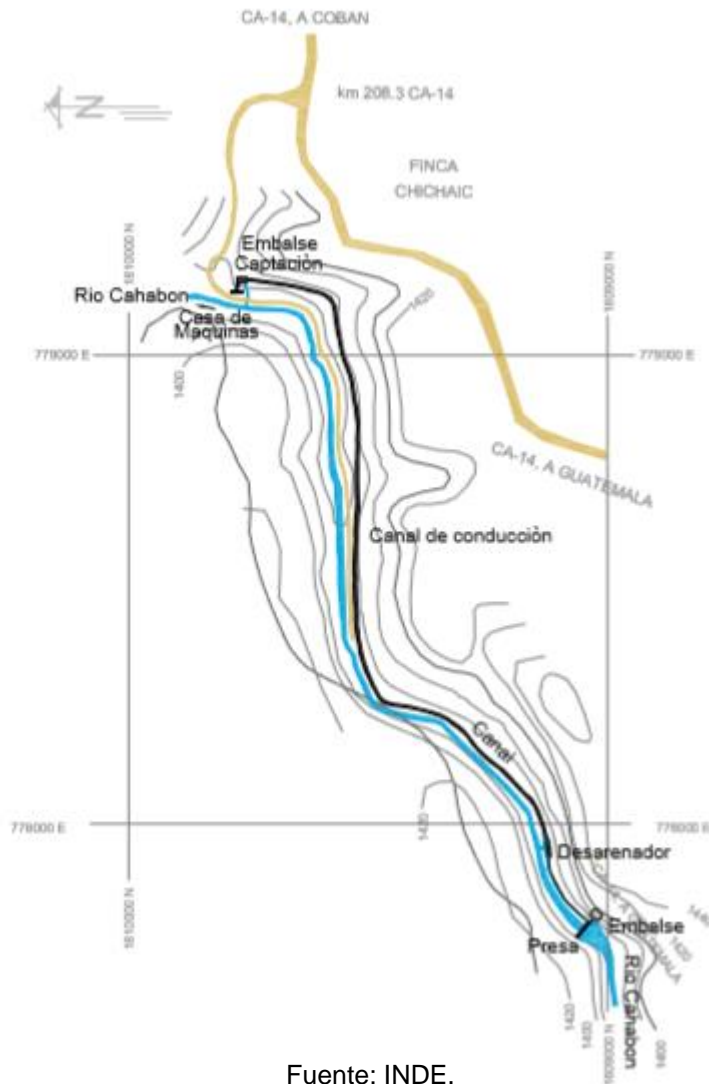
El embalse de captación está en perfecto estado, no presenta deformaciones en los muros ni formación de grietas. Se le da mantenimiento una vez al año, donde se vacía todo el embalse para inspección y limpieza de este.

Figura 17. **Embalse de captación hidroeléctrica Chichaic**



Fuente: INDE.

Figura 18. **Esquema hidroeléctrica Chichaic**



Fuente: INDE.

### 2.2.7. **Tubería forzada**

Es una tubería de acero que sale del embalse de captación hacia casa de máquinas, la tubería tiene una bifurcación que ayuda a desviar el flujo hacia dos turbinas Francis de eje horizontal. Las dimensiones de la tubería son las siguientes: en el primer tramo, antes de la bifurcación, tiene un diámetro de

1,35 metros, y las dos tuberías que salen de la bifurcación tienen diámetros de 0,90 metros. La tubería en total tiene una longitud de 15 metros, carece de chimenea de alivio, pero el embalse de captación cumple esa función.

La tubería de presión la cambiaron en 2013, y se encuentra en perfectas condiciones.

**Figura 19. Tubería de presión hidroeléctrica Chichaic**



Fuente: INDE.

### **2.2.8. Válvula**

La válvula de compuerta está ubicada a la salida de la tubería de presión y en la entrada de la turbina, con la finalidad de permitir el paso o el cierre del flujo de agua. Cada turbina cuenta con una válvula, la cual se ilustra en la figura 28.



Figura 20. **Válvula actual hidroeléctrica Chichaic**



Fuente: INDE.

Estas válvulas ya han alcanzado su vida útil y es muy difícil su manipulación, ya que cuentan con un mecanismo de operación manual. Por lo cual se tiene previsto el cambio de las válvulas en el próximo mantenimiento. Las válvulas para instalar se ilustran en la figura 29. Estas válvulas de admisión cuentan con un motor eléctrico, lo cual facilita el accionamiento de estas.

Figura 21. **Válvula nueva hidroeléctrica Chichaic**



Fuente: INDE.

Todos estos accesorios que componen la hidroeléctrica Chichaic se encuentran en buen estado, a excepción de la compuerta del desarenador, lo cual hace que parte del flujo del agua no pase por el desarenador y parte de este no pase por el proceso de limpieza, por lo cual existe la posibilidad de que parte de sólidos disueltos del agua lleguen a las turbinas provocando la erosión de sus componentes.

### **2.3. Turbinas Francis**

Los rodetes de las turbinas Francis son la principal causa de la deficiencia en la generación de energía, se llevó a cabo una evaluación de todas las partes que conforman las turbinas para identificar el estado actual de estas y determinar si únicamente el rodete es el problema. Las turbinas Francis han generado energía para el INDE desde 1979 y presentan las siguientes características generales:

Tabla IV. **Datos turbina Francis**

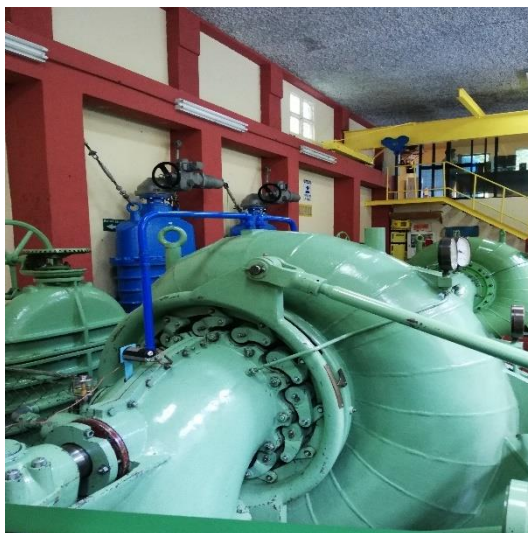
Tipo	Francis
Fabricante	Lasco
Año de fabricación	1963
Velocidad	900 rpm
Potencia	506 hp
Tipo de eje	Horizontal

Fuente: INDE.

### 2.3.1. **Partes de la turbina Francis**

Cámara espiral: es un elemento metálico, que hace de carcaza para la turbina Francis, su función es llevar el flujo de agua de manera uniforme hacia el distribuidor y a su vez transforma parte de la presión en energía cinética. Las cámaras espirales de las dos turbinas Francis se encuentran en buen estado, no presentan ninguna deformación.

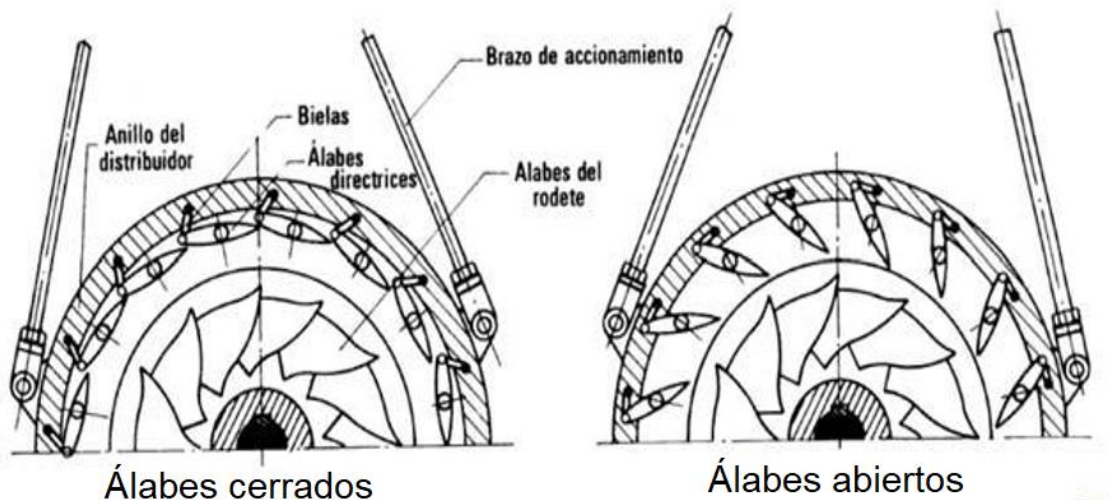
Figura 22. **Cámara espiral turbina Francis**



Fuente: INDE.

Distribuidor: está formado por un determinado número de palas móviles o álabes conectadas por un mecanismo de biela a un anillo, con el fin de regular la entrada de agua al rodete mediante la apertura y cierre de las palas.

Figura 23. **Distribuidor de turbina Francis**



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

El distribuidor de las dos turbinas Francis cuenta con el doble de palas que una turbina común debido a que el diseño de esta turbina cuenta con un rodete de doble salida.

Las palas o álabes de las turbinas Francis instaladas presentan muchas deformaciones, se realizó una prueba para verificar fugas del distribuidor hacia el rodete, la cual consiste en dejar ingresar agua a la turbina con las palas cerradas para observar si existen fugas. El resultado fue el siguiente:

Figura 24. **Prueba distribuidor turbina Francis**



Fuente: INDE.

Como se puede apreciar en la figura, la presencia de fugas es evidente, por lo que las palas necesitan ser reemplazadas ya que están distribuyendo el agua hacia el rodete de manera que pueden estar provocando erosión.

Rodete: es el elemento mecánico donde la energía potencial del agua se transforma en energía cinética rotacional, la cual se transmite a un eje que posteriormente transfiere esa energía rotacional a un generador para su transformación a energía eléctrica. Es un disco compuesto por álabes curvados.

Figura 25. **Rodete turbina Francis**



Fuente: INDE.

Los rodetes de las dos turbinas Francis están hechos de bronce y son rodetes de doble salida, es decir, utilizan el agua que ingresa a la turbina por las dos caras del rodete, por ende, las turbinas Francis de la hidroeléctrica Chichaic cuentan con dos tubos de aspiración.

Ambos rodetes presentan erosiones por lo que se generan vibraciones por desbalance y se ve afectada la generación de energía ya que es imposible operar con todo el recurso hídrico disponible debido a las vibraciones que se generan en las turbinas.

Tubo de aspiración: está conectado a la salida del rodete y su función es derivar el agua de la turbina hacia el cauce natural del río Cahabón. Ambas turbinas tienen dos tubos de aspiración, esto se debe al diseño doble del rodete. Al igual que las cámaras en espiral no presentan deformaciones ni fugas.

Figura 26. **Tubos de aspiración turbina Francis**



Fuente: INDE.

Regulador de velocidades: se utiliza para mover el anillo al que están unidas las palas del distribuidor, su función es abrir o cerrar las palas.

Figura 27. **Regulador de velocidades turbina Francis**



Fuente: INDE.

Actualmente, el regulador de velocidades de ambas turbinas se encuentra en buenas condiciones, pero a lo largo de 2018 la unidad 2 tuvo fallos en los tornillos de acople del eje al volante, debido a desgaste de los amortiguadores de hule dejando a la unidad fuera de línea por casi 2 meses, meses más tarde tuvo fugas de aceite, debido a problemas en el mecanismo interno del regulador de velocidades, el cual fue llevado al torno para su reparación.

Volante de inercia: se encarga de agregar una inercia adicional al sistema turbina-generator, se utiliza para oponerse a aceleraciones bruscas.

Figura 28. **Volante de inercia turbina Francis**



Fuente: INDE.

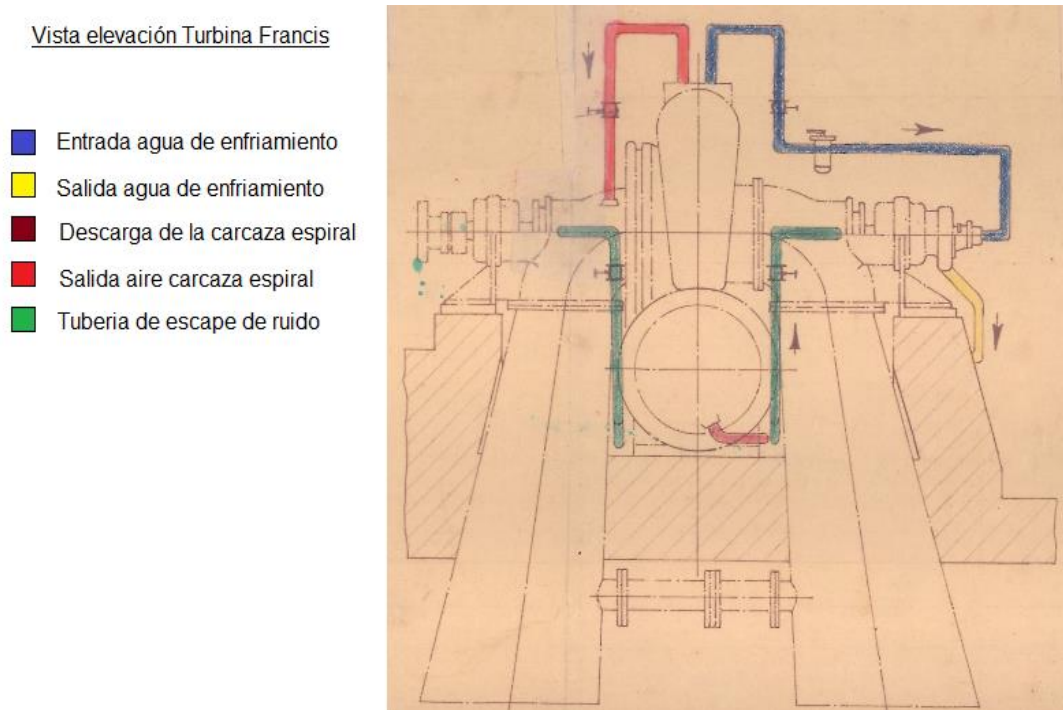
### **2.3.2. Sistema de enfriamiento**

El sistema de enfriamiento este compuesto por una serie de tuberías que transportan agua para mantener una temperatura de trabajo adecuada en las chumaceras, las chumaceras cuentan con babbitt y una pequeña película de aceite para la protección del eje. El sistema de enfriamiento opera de manera



correcta para ambas turbinas, puesto que la temperatura en las chumaceras siempre está en el rango de operación.

Figura 29. **Sistema de enfriamiento**



Fuente: INDE.

### 2.3.3. **Mantenimiento**

Para el mantenimiento tanto de las turbinas como de los generadores se utiliza un mantenimiento predictivo diario a partir de aplicación de técnicas VOSO por parte del personal operador. De existir una falla o algo fuera del rango de operación normal se pasa un mantenimiento correctivo para corregir el problema. A su vez, se manejan otros mantenimientos predictivos por medio de termografía y análisis de vibraciones, de los cuales se cuenta con el equipo para realizar

estas tareas, pero no con una persona destinada para hacerlo por lo cual no se llevan inspecciones periódicas.

También se aplica programación a largo plazo (PLP), es decir, se programa con meses de anticipación las tareas por realizar para el año siguiente, cada año la hidroeléctrica tiene aproximadamente 2 semanas de paro en donde se vacía el embalse para inspeccionar o reparar problemas que existan a lo largo del canal y compuertas. En la programación a largo plazo se realizan inspecciones a los elementos internos de las turbinas y se hacen las tareas de mantenimiento necesarias. Para realizar esas 2 semanas de paro se toma en cuenta los meses del año donde se tiene previsto menor afluencia de agua en el río Cahabón.

#### 2.4. Generadores

Son los encargados de transformar la energía mecánica proveniente de la turbina en energía eléctrica. Están acoplados a las turbinas mediante un eje. Ambos generadores son idénticos y tienen las siguientes características:

Tabla V. **Datos de los generadores**

Tipo	Generador síncrono
Fabricante	Garbe-Lahmeyer, Aachen
Año de fabricación	1963
Velocidad	900 rpm
Capacidad	430 kVA
Factor de potencia	0,8
Tensión nominal	400 V
Intensidad nominal	621 A
Régimen de funcionamiento nominal	C
Sentido de giro	→
Frecuencia	60 hz
Corriente nominal de excitación	55 A
Clase de aislamiento	B

Continuación de la tabla V.

Peso	2,540 toneladas
------	-----------------

Fuente: INDE.

Figura 30. **Placa del generador de la hidroeléctrica**



Fuente: INDE.

### 2.4.1. Partes del generador

Los generadores cuentan con las siguientes partes:

- Núcleo del estator
- Bobinas del estator
- Ventilador
- Rotor
- Carcasa del estator
- Excitador

- Cabezales
- Bobinas del rotor
- Anillos colectores
- Escobillas del colector
- Núcleo del rotor
- Campana
- Chumaceras

Figura 31. **Generador, hidroeléctrica Chichaic**



Fuente: INDE.

El estado actual de los generadores es el adecuado, no existe deficiencia en ninguna de sus partes. Incluso los generadores tienen una capacidad de generación superior a lo que se está generando actualmente debido a los problemas con el rodete.

Generalmente reciben mantenimiento correctivo debido al desgaste de las escobillas, pero es una tarea de mantenimiento sencilla.

Figura 32. **Escobillas, generador, hidroeléctrica Chichaic**



Fuente: INDE.

#### **2.4.2. Sistema de enfriamiento**

Los generadores usan como sistema de enfriamiento un ventilador, el cual se ve favorecido por las corrientes de aire que se generan por el movimiento circular del rotor, haciendo que este mantenga una temperatura de trabajo adecuada. A su vez, se usa aceite para proteger y mantener la temperatura adecuada de los cojinetes.

#### **2.4.3. Mantenimiento**

El mantenimiento de los generadores, al igual que el de las turbinas, se basa en la inspección diaria por medio de técnicas VOSO, si se llegase a encontrar una falla se procede a intervenir para corregir el problema.

Por lo general a los generadores se les realiza un mantenimiento preventivo, en el cual se procede al cambio de escobillas y cojinete, lubricación y limpieza. Generalmente, estas tareas se realizan durante las dos semanas de paro de la hidroeléctrica según la programación a largo plazo.

Figura 33. **Mantenimiento al generador**



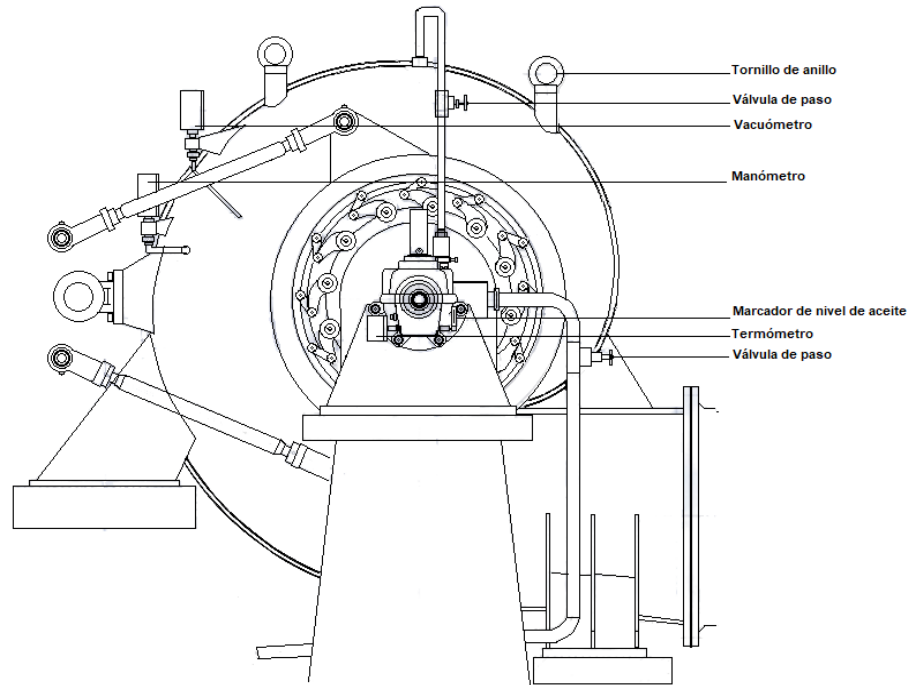
Fuente: INDE.

## 2.5. Instrumentación de la hidroeléctrica

La instrumentación hace referencia a instrumentos que se utilizan para medir o cuantificar diferentes variables los cuales indican si existe un correcto funcionamiento de las máquinas si cumplen con ciertos parámetros.

La hidroeléctrica Chichaic cuenta con distintos instrumentos de medición en los que se destacan los instrumentos para medir variables eléctricas, que se encuentran en los paneles de control. En cuanto a instrumentación mecánica se cuenta con medidores de presión, de temperatura y nivel de lubricantes que están equipados a las turbinas Francis instaladas.

Figura 34. Instrumentación turbina Francis 1



Fuente: INDE.

Figura 35. Instrumentación turbina Francis 2



Fuente: INDE.

Figura 36. Nivel de aceite, chumaceras de la turbina



Fuente: INDE.

Figura 37. Nivel de aceite, regulador de velocidades



Fuente: INDE.



Figura 38. **Termómetro, chumaceras del eje de la turbina**



Fuente: INDE.

## **2.6. Causa del bajo rendimiento en la generación de la hidroeléctrica**

Una vez evaluada cada una de las partes que conforman la hidroeléctrica Chichaic se determinó lo siguiente:

La principal causa del bajo rendimiento en la generación de energía se debe a la erosión de los rodetes de ambas turbinas Francis, puesto que impiden que se trabaje con todo el flujo de agua disponible. Si se trabaja con todo el flujo disponible se empiezan a generar vibraciones dentro de las turbinas.

Las vibraciones se deben al desbalanceo mecánico que presenta el rodete, este al estar erosionado pierde material y al momento de girar lo hace de manera no uniforme produciendo vibraciones. Estas aumentan la temperatura dentro de la turbina que pueden causar cavitación e incluso dañar otras partes de esta.

La erosión es un problema común en máquinas hidráulicas y se debe a la presencia de sólidos en el agua, la velocidad y dureza. Estas provocan el desprendimiento de material de los elementos metálicos, en este caso el rodete.

Para determinar que causo la erosión del rodete se debe tomar en cuenta lo siguiente:

Las turbinas se construyeron en 1963, superan los 50 años desde su fabricación por lo cual muchos de los materiales que se usaron para su construcción han perdido sus propiedades mecánicas y actualmente no son los ideales para ser utilizados en turbinas.

La geografía e hidrología del terreno donde se ubica la hidroeléctrica son la razón principal de la presencia de calcio en el agua, por lo que los materiales actuales para los elementos internos, tanto palas como rodete, no son los adecuados.

El rodete ya ha tenido varios reacondicionamientos por lo que no es una solución para evitar el desgaste de este. Actualmente, la turbina empezó a tener fallas en otras partes como lo es el regulador de velocidades.

La presencia de sólidos en el agua se debe a la contaminación del río por las comunidades cercanas y la fuga en la compuerta del desarenador evita que se pueda limpiar parte del agua que ingresa en las turbinas.

Las palas están deformadas, lo cual provoca que el chorro de agua no se dirija de manera adecuada al rodete, lo que puede estar provocando el desgaste de este.

Para solucionar esto existen dos alternativas la primera se detalla en la fase de servicio técnico profesional, la cual está orientada al diseño de las turbinas adecuadas para la hidroeléctrica que puedan aumentar la generación de energía.

La segunda es un reacondicionamiento de los rodets y las paletas la cual no es recomendable ya que no asegura un funcionamiento óptimo de las turbinas puesto que superan los 50 años de fabricación alcanzando su vida útil y puede tener fallas en otros elementos.

Los elementos que necesitan un reacondicionamiento son los dos rodets de las turbinas y sus palas, las turbinas tienen un juego de 18 palas por cada una, puesto que los rodets son de doble salida y utilizan el doble de palas que las turbinas ordinarias. Dicho esto, el cálculo de costo de reparación se centra en el reacondicionamiento y balanceo de 2 rodets y 36 palas.

Para el reacondicionamiento de las palas que están fabricadas con acero inoxidable se recomienda el método de HVOF, es un método que se utiliza para recubrir o restaurar superficies, atomizando materiales fundidos por medio de una corriente de gas y de alta temperatura sobre la superficie de la pieza. El precio de aplicación de este método ronda alrededor de \$ 350 por pie cuadrado. Las palas tienen una superficie aproximada de 0,25 pie cuadrados. El costo total de recubrir las 36 palas se estima en \$ 3 150.

Para el reacondicionamiento de los rodets que son de bronce se recomienda la reparación con soldadura, balanceo, tratamiento térmico y maquinado. El costo de esto dependerá de la cantidad de soldadura por aplicar, se establece un costo de \$ 200 en electrodos y alrededor de \$ 1 000 entre balanceo, tratamiento térmico y maquinado de los dos rodets.

Se estima que el costo de reparación ronda alrededor de \$ 5 000 por cambios en los precios y otras cosas que pudieron no tomarse en cuenta, puesto que el objetivo principal de este informe está orientado en el rediseño de dos turbinas nuevas que se adecuen a las capacidades de la hidroeléctrica; invertir en la reparación de estos equipos sería desaprovechar las capacidades hídricas para la generación.

## 2.7. Características de la hidroeléctrica

Para demostrar que se está desaprovechando la capacidad hídrica del embalse, a continuación, se presenta las características actuales en generación que tiene la hidroeléctrica Chichaic tomando como referencia el 2018, año con menor cantidad de energía generada en la historia de la hidroeléctrica.

Tabla VI. **Generación mensual año 2018**

<b>Mes del 2018</b>	<b>Energía generada MWh</b>	<b>Q medio m<sup>3</sup>/s</b>
Enero	330	7,38
Febrero	194	7,40
Marzo	168	4,77
Abril	146	4,04
Mayo	115	4,23
Junio	99	7,95
Julio	141	6,85
Agosto	192	4,88
Septiembre	148	6,33
Octubre	113	9,26
Noviembre	111	5,79
Diciembre	116	3,59
<b>Total</b>	<b>1 873</b>	

Fuente: elaboración propia.

En 2018 se logró generar 1 873 MWh, cifra jamás vista por la hidroeléctrica, esto se debe a que una de las turbinas, estuvo fuera de línea más de la mitad del año, razón por la cual se vio afectada la generación. No obstante, es un reflejo de la actualidad de la hidroeléctrica, turbinas en mal estado.

Para justificar el reemplazo de los equipos, a continuación, se hace una proyección de la cantidad de energía que se puede generar con turbinas adecuadas para la hidroeléctrica.

Para estimar la cantidad de energía que se puede generar se debe calcular la potencia de la turbina. La fórmula de la potencia es la siguiente:

$$P = \frac{W}{T}$$

Donde:

- P = potencia (W)
- W = trabajo (J)
- T = tiempo (s)

El trabajo también puede ser descrito como fuerza aplicada una distancia, por lo tanto:

$$P = \frac{Fd}{T}$$

La fuerza se define como masa por aceleración:

$$P = \frac{mad}{T}$$

La aceleración y la distancia para calcular la potencia en una turbina están asociadas con la gravedad y el salto, por lo tanto:

$$P = \frac{mgh}{T}$$

La masa en este caso corresponde a la masa del agua, se puede reemplazar de la siguiente manera haciendo uso de la ecuación de densidad:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Donde:

- $\rho$  = densidad (Kg/m<sup>3</sup>)
- $m$  = masa (kg)
- $v$  = volumen (m<sup>3</sup>)

Despejando masa de la ecuación anterior:

$$m = \rho v$$

Reemplazando la masa en la ecuación de potencia:

$$P = \frac{\rho vgh}{T}$$

Por último, la relación entre el volumen respecto del tiempo es caudal:

$$P = \rho gQh$$

Esta potencia no es la potencia total que se aprovecha, ya que hay que tomar en cuenta las pérdidas que se producen por fricción, fugas y otros factores, en el recorrido del agua por las tuberías y maquinaria. Por lo que a la ecuación se le añaden factores de rendimiento, en este caso de la turbina y el generador.

$$P = \rho g Q h R_t R_g$$

Donde:

- $P$  = potencia generada (kW)
- $\rho$  = densidad del agua (1 000 kg/m<sup>3</sup>)
- $g$  = gravedad (9,81 m/s<sup>2</sup>)
- $Q$  = caudal (m<sup>3</sup>/s)
- $h$  = salto (m)
- $R_t$  = rendimiento de la turbina
- $R_g$  = rendimiento del generador

Con la ecuación descrita se procede a comparar la cantidad de energía generada mensual, con una proyección, tomando como referencia un rendimiento de 0,90 para la turbina y uno de 0,95 para el generador:

Enero 2018:

Fueron 330 078 kWh en el mes, aproximadamente 330 MWh al mes, con un caudal promedio de 7,38 m<sup>3</sup>/s.

Se pudo generar  $P = (1\ 000) (9,81) (7,38) (20) (0,90) (0,95) = 1\ 238,00$  kW.

Con la prolongación de la potencia generada por horas al mes, se obtiene:

$$\text{Producción mensual} = (1\,238,00 \text{ kW}) \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} = 891\,360 \text{ kWh al mes}$$

Aproximadamente 891,36 MWh.

De esta manera se calculó la energía generada proyectada, el cálculo de los demás meses se encuentra en la sección de apéndices de este documento. En la siguiente tabla se hace la comparación de la cantidad de energía que se generó en 2018, con la cantidad de energía que se puede generar con las características actuales de la hidroeléctrica.

Tabla VII. **Generación mensual año 2018 y proyección**

Mes del 2018	Q medio m <sup>3</sup> /s	Energía Generada MWh	Generación proyectada MWh
Enero	7,38	330	891
Febrero	7,40	194	893
Marzo	4,77	168	576
Abril	4,04	146	487
Mayo	4,23	115	510
Junio	7,95	99	960
Julio	6,85	141	827
Agosto	4,88	192	589
Septiembre	6,33	148	764
Octubre	9,26	113	1 118
Noviembre	5,79	111	699
Diciembre	3,59	116	433
	Total	1 873	8 747

Fuente: elaboración propia.

La hidroeléctrica tiene alrededor de 6 430 horas de operación al año, la generación proyectada se realizó como si se trabajara todo el año al caudal medio



mensual, para tener un dato de la generación proyectada total, más acorde con la realidad se hará lo siguiente:

Un año tiene 8 760 horas de las cuales solo 6 430 son operables para la hidroeléctrica, por lo tanto, se trabaja un 73 % de las horas al año. Los 8 747 MWh generados al año, según la proyección, corresponden a trabajar el 100 % de horas al año, multiplicando ese valor por el 73 % que corresponden a las horas operables obtenemos lo siguiente.

Tabla VIII. **Generación anual año 2018 y proyección**

	<b>Energía MWh</b>	<b>Generada</b>	<b>Generación proyectada MWh</b>
Total, año 2018		1 873	6 385
Generación mensual, año 2018		156,08	532,08

Fuente: INDE.

Con las características actuales de caudal y salto que tiene la hidroeléctrica, en 2018 se pudo haber generado aproximadamente el triple de lo que se generó. En los meses que presentan valores de caudal que superan los 6 m<sup>3</sup>/s se pueden alcanzar valores de generación de hasta 1 MW, dato que supera la capacidad de los generadores, por lo tanto, se debe tomar en cuenta un cambio de turbinas con sus respectivos generadores. Para cuantificar el impacto monetario de esto, a continuación, se hace la misma comparación, pero tomando en cuenta el precio por megavatio hora generado.

El precio por megavatio hora generado está regulado por la AMM (Administrador del Mercado Mayorista). La AMM es una entidad privada que se encarga de coordinar la operación de centrales generadoras, establecer precios

en el mercado eléctrico, garantizar el abastecimiento de energía eléctrica en el país y otras funciones.

Tabla IX. **Generación anual e ingresos por generación año 2018**

Mes	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Megavatios generados (MWh)	Precio por megavatio generado (\$)	Total (\$)
Enero	7,38	330	39,64	13 081,20
Febrero	7,40	194	46,37	8 995,78
Marzo	4,77	168	56,22	9 444,96
Abril	4,04	146	56,69	8 276,74
Mayo	4,23	115	67,48	7 760,20
Junio	7,95	99	55,86	5 530,14
Julio	6,85	141	66,16	9 328,56
Agosto	4,88	192	84,56	16 235,52
Septiembre	6,33	148	76,01	11 249,48
Octubre	9,26	113	73,02	8 251,26
Noviembre	5,79	111	71,63	7 950,93
Diciembre	3,59	116	54,71	6 346,36
	Total	1 873	Total	112 451,13

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Generación e ingresos proyectados por generación año 2018**

Mes	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Megavatios Generados (MWh)	Precio por Megavatio generado (\$)	Total (\$)
Enero	7,38	891	39,64	35 319,24
Febrero	7,40	893	46,37	41 408,41
Marzo	4,77	576	56,22	32 382,72
Abril	4,04	487	56,69	27 608,03
Mayo	4,23	510	67,48	34 414,80
Junio	7,95	960	55,86	53 625,60
Julio	6,85	827	66,16	54 714,32
Agosto	4,88	589	84,56	49 805,84
Septiembre	6,33	764	76,01	58 071,64

Continuación tabla X.

Octubre	9,26	1 118	73,02	81 636,36
Noviembre	5,79	699	71,63	50 069,37
Diciembre	3,59	433	54,71	23 689,43
	Total	8 747	Total	542 745,76

Fuente: elaboración propia.

El valor total de ingresos proyectados es una suposición de que se trabaja todo el año con el caudal correspondiente mensual, por ende, debe hacerse la corrección aplicada anteriormente con el coeficiente de 0,73 correspondiente al porcentaje de operación de la hidroeléctrica.

Utilizando el precio del dólar de \$1 = Q. 7,70 obtenemos los siguientes resultados.

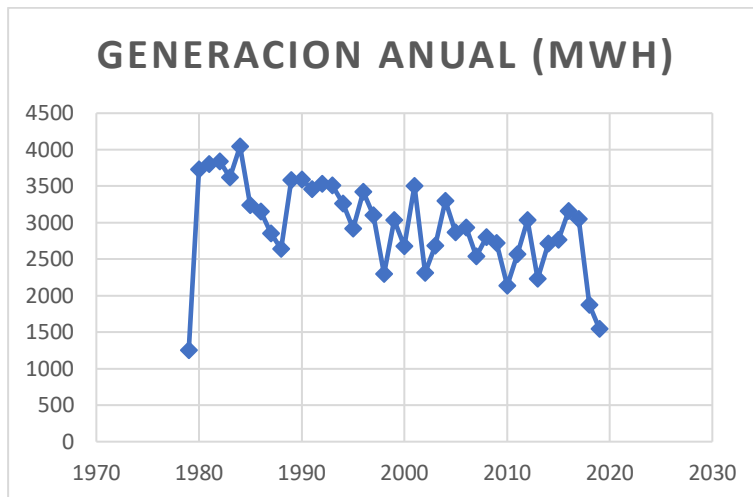
**Tabla XI. Ingresos del año 2018 e ingresos proyectados**

	Ingresos año 2018 \$	Ingresos año 2018 Q.	Ingresos proyectados \$	Ingresos proyectados Q.
Total	112 451,13	865 873,70	396 204,40	3 050 773.88

Fuente: elaboración propia.

En 2018 la hidroeléctrica dejó de recibir alrededor de Q. 2 184 900,18 en ingresos por generación de energía, razón por la cual es necesario un rediseño de esta, ya que parte de esta gran diferencia se debe a fallas en las turbinas y en la siguiente gráfica se puede ver cómo la generación de energía anual va en decremento.

Figura 39. **Gráfica de historial de generación**



Fuente: INDE.

## 2.8. Clasificación de la hidroeléctrica

La hidroeléctrica Chichaic se puede clasificar como una central hidroeléctrica de embalse o de regulación, ya que capta el recurso hídrico por medio de una presa y tiene un embalse, luego regula la entrada de agua al canal mediante la apertura de una compuerta.

También se clasifica como hidroeléctrica de salto de mediana altura ya que cuenta con un salto de 20 metros.

La clasificación de una hidroeléctrica acorde a su potencia es la siguiente:

- Micros centrales: máximo de 99 kW
- Pequeña potencia: 100-999 kW
- Potencia media: 1 000-9 999 kW.

- De gran potencia: desde 10 000 kW en adelante

La hidroeléctrica Chichaic tiene una potencia instalada de aproximadamente 700 kW con el diseño original por lo que se cataloga como una central hidroeléctrica de pequeña potencia, a lo largo de su historia el valor máximo de potencia que se ha podido generar ronda por 600 kW, tomando como referencia los últimos 10 años se registra una potencia de 533 kW.

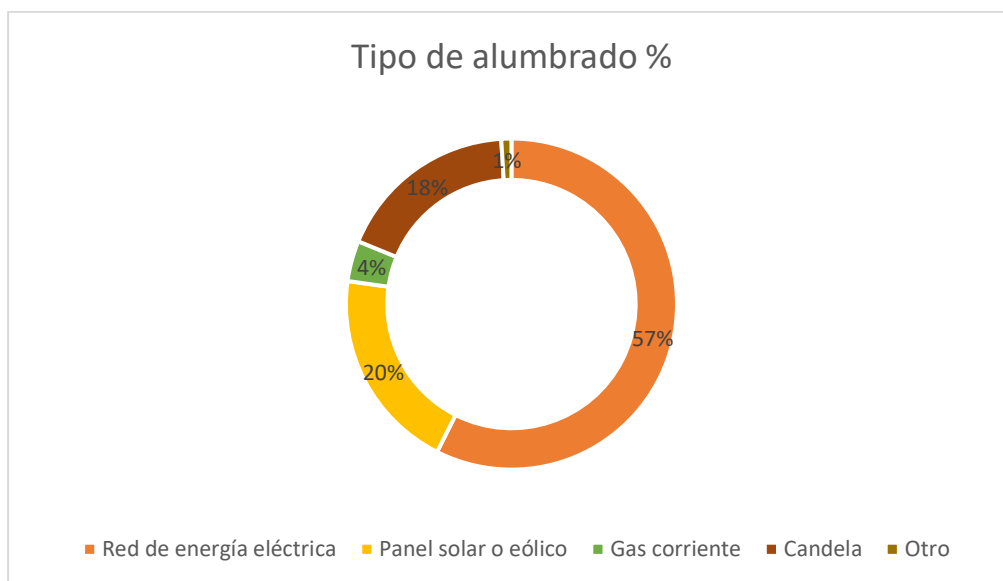
Las características hídricas de la hidroeléctrica y el salto de 20 metros, con equipos eficientes pueden generar una potencia de 1 MW, en los meses que se logre un caudal de al menos 6 m<sup>3</sup>/s, clasificándola como central hidroeléctrica de potencia media.

## **2.9. Demanda energética de la región**

La hidroeléctrica Chichaic está ubicada en la región de Alta Verapaz, departamento que destaca por la diversidad de centrales hidroeléctricas y la magnitud de estas, dado es el caso de Chixoy y el complejo hidroeléctrico Renace. La demanda energética de la región hace referencia a la cantidad de energía que consume la población y en que la emplea.

Según el censo realizado en 2018 por el INE (Instituto Nacional de Estadística de Guatemala), la región en donde está ubicada la hidroeléctrica Chichaic, está limitada por el municipio de Cobán en el cual hay 43 165 hogares de los cuales únicamente 24 924 cuentan con red de energía eléctrica, siendo estos alrededor del 57 % de los hogares.

Figura 40. **Gráfica tipo de alumbrado**



Fuente: elaboración propia, con datos de los resultados censo 2018, gráfica tipo de alumbrado, INE.

Realizando un aproximado del consumo de energía para cada hogar se puede establecer una idea de la cantidad de la demanda energética, utilizando la siguiente tabla se procede a establecer el consumo de energía para un hogar.

Tabla XII. **Consumo de energía por hogar**

Aparato eléctrico	cantidad	Horas de uso diario (h)	Días al mes de uso (días)	kWh
DVD	1	3	4	0,10
Computadora	1	5	30	52,50
Radio	1	4	30	6,00
Televisor	1	5	30	52,50
Lavadora	1	2	10	10,00

Continuación tabla XII.

Refrigeradora	1	24	30	252,00
Foco ahorrador	10	5	30	16,50
			Total	389,60

Fuente: elaboración propia.

Principalmente el consumo de energía se utiliza en aparatos eléctricos de baja potencia, y el consumo puede variar dependiendo de la cantidad de dispositivos y el uso que les den, y es proporcional a la cantidad de personas que habitan por hogar, por estas variaciones se incrementara el consumo promedio a 450 kWh por hogar. Tomando esto en cuenta se puede determinar un aproximado de la demanda energética.

Tabla XIII. **Demanda energética de la región**

Hogares con red de energía eléctrica	Consumo promedio de energía por hogar kWh mensual	Demanda energética en MWh mensual
24 924	450	11 215,80

Fuente: elaboración propia.

La demanda mensual de la región ronda alrededor de 11 215,80 megas, basándose únicamente en el uso de la energía a nivel residencial. En la siguiente tabla se muestra cómo se ha suplido esta demanda, tomando como referencia los datos de la tabla VI y datos de historial de generación de la hidroeléctrica Chichaic.

Tabla XIV. **Generación mensual hidroeléctrica Chichaic**

	<b>Generación MWh</b>
<b>Producción mensual historial de generación</b>	249,58
<b>Producción mensual año 2018</b>	156,08
<b>Producción mensual proyección año 2018</b>	532,08

Fuente: elaboración propia.

La hidroeléctrica ha tenido un promedio de generación mensual de 249,58 MWh, actualmente se encuentra por debajo de esta cifra, razón por la cual es necesario llevar a cabo el rediseño de esta. Actualmente se está cubriendo alrededor del 1,39 % de la demanda de energía de la región, anteriormente se cubría el 2,23 % de la demanda. Realizando el rediseño de la hidroeléctrica tomando como referencia el año 2018, se puede cubrir el 4,74 % de la demanda, duplicando el promedio de generación mensual histórico de la hidroeléctrica.

Otra manera de cuantificar la demanda de energía y justificar que es necesario un rediseño es la siguiente:

La hidroeléctrica ha generado energía para la región por al menos 40 años, durante este tiempo ha tenido una demanda real de 250 MWh, cifra que corresponde al promedio mensual de energía generada en todo su historial de generación. Durante esos 40 años la demanda energética de la región ha ido incrementando, por la incursión de empresas que consumen energía a nivel industrial, incremento de la población y avances en tecnología que ha permitido la creación de distintos aparatos eléctricos.



Por estas razones actualmente la hidroeléctrica se ha ido quedando obsoleta puesto que apenas ha logrado cumplir el 1,39 % de la demanda actual de la región.

Tabla XV. **Demandas energéticas**

<b>Demanda real de la hidroeléctrica mensual</b>	250 MWh
<b>Demanda actual de la hidroeléctrica mensual</b>	156,08 MWh
<b>Demanda energética de la región mensual</b>	11 215,80 MWh
<b>Demanda proyección 2018 mensual</b>	532,08 MWh

Fuente: elaboración propia.

Las proyecciones realizadas en la fase de investigación tomando como referencia el 2018 se hicieron para justificar, basándonos en el último año de operación de la hidroeléctrica la necesidad de un rediseño para esta. El estudio adecuado utilizando el historial de caudales para generación y otros factores se realizan en la fase de servicio técnico profesional, en donde se tratará el rediseño adecuado para la hidroeléctrica Chichaic.



### **3. SERVICIO TÉCNICO PROFESIONAL**

Esta sección está dedicada al rediseño de la hidroeléctrica, como se demostró en la fase de investigación es necesario un cambio de equipos para mejorar el funcionamiento de la hidroeléctrica y generar más energía, para medir la capacidad de las turbinas adecuadas se realizan los siguientes cálculos.

#### **3.1. Cálculo del potencial hidrológico**

El potencial hidrológico hace referencia al uso del agua de una cuenca hidrológica, aguas superficiales y aguas subterráneas, para aprovecharla en diferentes usos, en este caso la generación de energía.

Para estimar la capacidad de las turbinas adecuadas para la hidroeléctrica es necesario conocer la capacidad de generación de esta. Utilizando los valores de caudal promedio registrados se hace la proyección de la cantidad de energía que se puede lograr a generar.

La proyección se hará de la misma manera que se realizó en el apartado de características de la hidroeléctrica de este documento, simplificando la ecuación de la potencia debido a que los valores de densidad del agua y gravedad son constantes de la siguiente manera:

$$P = 9\,810\, Q\, h\, R_t R_g$$

Donde:

- P = potencia generada (kW)
- Q = caudal (m<sup>3</sup>/s)
- h = salto (m)
- R<sub>t</sub> = rendimiento de la turbina
- R<sub>g</sub> = rendimiento del generador

Al igual que la proyección realizada anteriormente se toma un valor de 0,90 para el rendimiento de la turbina y uno de 0,95 para el rendimiento del generador, siendo estos valores aceptados para los equipos actuales.

El salto como se ha mencionado anteriormente corresponde a 20 metros y los caudales por utilizar se muestran en la siguiente tabla, los cuales corresponden a los caudales promedio de la hidroeléctrica.

Tabla XVI. **Caudales promedio obtenidos durante los últimos 23 años utilizados para la generación**

<b>Mes</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>
Enero	5,24
Febrero	4,35
Marzo	3,62
Abril	2,50
Mayo	2,66
Junio	5,54
Julio	6,77
Agosto	8,18
Septiembre	9,78
Octubre	10,51
Noviembre	8,29
Diciembre	6,96

Fuente: INDE.

Aplicando la ecuación se obtiene lo siguiente:

Enero:

Tiene un caudal promedio de 5,24 m<sup>3</sup>/s, en el cual se pueden generar:

$$P = 9\,810 (5,24) (20) (0,90) (0,95) = 879,02 \text{ kW.}$$

Haciendo la prolongación de la potencia generada por horas al mes, se obtiene:

$$\text{Producción mensual} = (879,02 \text{ kW}) \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} = 632\,891 \text{ kWh al mes}$$

Aproximadamente 632,89 MWh.

De esta manera se realizó la proyección para cada uno de los meses, los demás cálculos se encuentran en la sección de apéndices de este documento.

En la siguiente tabla se muestra la capacidad de generación que tiene la hidroeléctrica Chichaic, al igual que la proyección anterior se debe tomar en cuenta que se está suponiendo que se trabaja el 100 % del año y a caudal constante, para corregir esto, el valor de generación total se multiplica por un factor de 0,73 correspondiente al 73 % de horas de operación anuales.

Tabla XVII. **Generación anual con rediseño de la hidroeléctrica**

<b>Mes</b>	<b>Potencia kW</b>	<b>Caudal m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Generación proyectada MWh</b>
Enero	879	5,24	632,89
Febrero	729	4,35	525,39
Marzo	607	3,62	437,22
Abril	419	2,50	301,95
Mayo	446	2,66	321,27
Junio	929	5,54	669,12
Julio	1 135	6,77	817,68
Agosto	1 372	8,18	987,98
Septiembre	1 640	9,78	1 181,23
Octubre	1 763	10,51	1 269,40
Noviembre	1 390	8,29	1 001,27
Diciembre	1 167	6,96	840,63
Promedio	1 040	Total	8 986,08

Fuente: elaboración propia.

Utilizando el factor de corrección descrito anteriormente se obtiene:

Tabla XVIII. **Capacidad de generación anual**

	<b>Capacidad de generación anual MWh</b>
Total	6 559,84

Fuente: elaboración propia.

La hidroeléctrica tiene una capacidad de generación anual de 6 559,89 MWh y una potencia promedio de 1 040 kW realizando un rediseño de sus equipos.

### **3.2. Propuesta de rediseño**

Una vez definido la potencia de la hidroeléctrica y su capacidad de generación, se selecciona el tipo de turbina adecuada tomando en consideración:

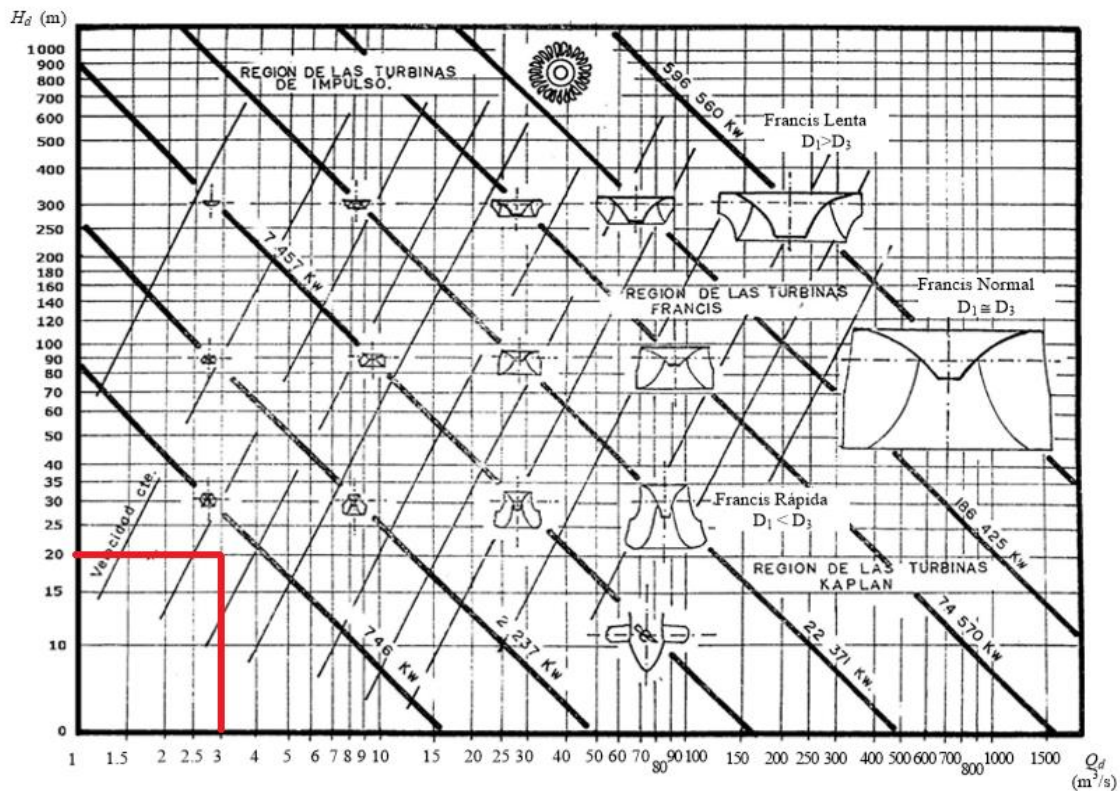
Los componentes de la hidroeléctrica desde el embalse hasta las válvulas a la entrada de las turbinas están en buenas condiciones, y algunas ya han sido modificadas por lo que no se realizarán cambios en estas.

En cuanto al tipo de turbinas a instalar se considera seguir con el mismo tipo de turbinas Francis, puesto estas son las ideales para el caudal y el salto con que se cuenta según la figura 40. Como se puede observar la característica de salto y caudal de la hidroeléctrica la ubican en la región de turbinas Francis rápidas, que se caracterizan por que el diámetro de entrada es inferior al diámetro de salida. Se utiliza un caudal de  $3,10 \text{ m}^3/\text{s}$  porque se plantea utilizar dos turbinas Francis, siendo este la mitad del caudal promedio de  $6,20 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Cabe destacar que no se contempla el uso de otro tipo de turbinas puesto que las Kaplan necesitan caudales grandes y saltos pequeños, y las turbinas Pelton saltos grandes y caudales pequeños, características que no se adecuan a la hidroeléctrica Chichaic.

El número de unidades seguirá siendo dos, porque el uso de dos unidades permite la utilización solo de una en los meses con caudal bajo, reduciendo costo de operación y al momento de realizar mantenimientos a las unidades se pararía una y se puede seguir generando con la otra.

Figura 41. Selección del tipo de turbina según caudal y salto



Fuente: NAVA MASTACHE, Arturo. *Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas*. p.133

Una vez dadas estas consideraciones se procede a dimensionar las turbinas Francis adecuadas empezando con la selección del rodete, en base a la velocidad específica con que se pretenda trabajar. Utilizando la siguiente ecuación.

$$N_s = nP^{1/2}h^{-5/4}$$

Donde:

$N_s$  = velocidad específica

$n$  = número de rpm

$P$  = potencia en kW



h = salto en m

Considerando que se utilizaran dos unidades Francis la potencia se debe dividir en dos, por lo tanto, la hidroeléctrica generaría 1 040 kW a partir de dos turbinas de 520 kW. Para calcular el tamaño de rodete de una turbina se utiliza la potencia únicamente de una.

P = 520 kW

h = 20 m

$$N_s = n(520)^{1/2}(20)^{-5/4}$$

$$N_s = 0,54n$$

Como se puede observar la ecuación depende de un valor de n, ese valor hace referencia al número de revoluciones por minuto que tendría la turbina, para elegir el número de rpm es necesario utilizar la siguiente tabla, la cual nos muestra las velocidades de sincronización válidas para una frecuencia de 60 hz, frecuencia utilizada en Guatemala.

Tabla XIX. **Velocidades síncronas y velocidad específica**

<b>Velocidades de sincronización n (rpm)</b>	<b>Valor de N<sub>s</sub> (rpm)</b>
1200	648
900	486
720	388,80
600	324
514	277,56
450	243
400	216
360	194,40
325	175,50

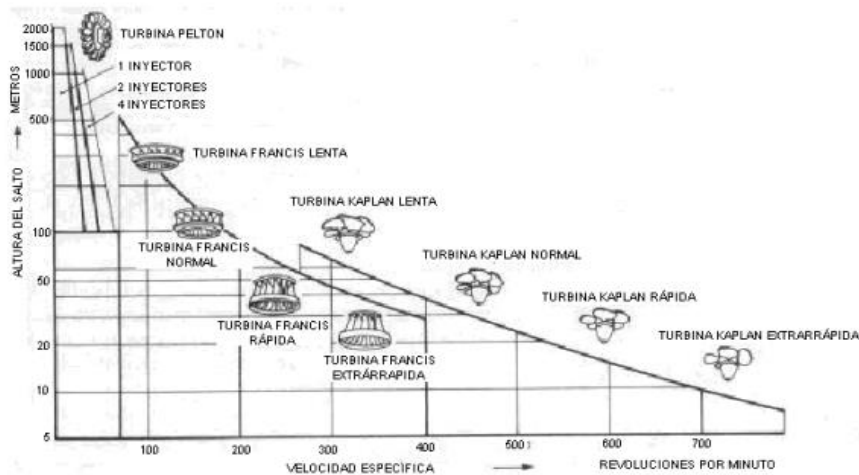
Continuación tabla XIX.

	300	162
	275	148,50
	257	138,78
	240	129,60

Fuente: elaboración propia.

El rango de operación de valores  $N_s$  para turbinas Francis corresponde de 100 a 400 como se muestra en la figura 41, por lo que se pueden utilizar los valores de  $n$  de 240 rpm a 720 rpm. Se recomienda elegir la velocidad más alta admisible puesto a que mayor velocidad de giro del rodete se beneficia al generador.

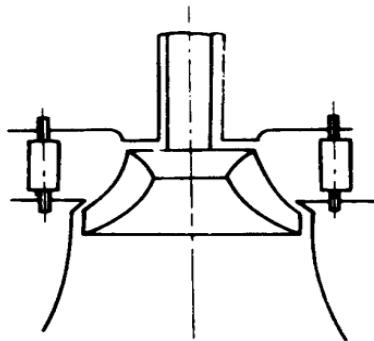
Figura 42. Selección de rodete radio axial



Fuente: ENCINAS, Manuel Polo. *Turbomáquinas hidráulicas*. p. 115.

Escogiendo una velocidad de 720 rpm correspondiente a un  $N_s$  de 388,80, rango donde la turbina Francis se clasifica como turbina extrarrápida y el rodete debe tener una forma radio axial de la siguiente manera.

Figura 43. **Rodete radio axial**



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

El dimensionamiento de los elementos de una turbina se ha logrado en base al análisis de turbinas construidas anteriormente, haciendo interpolaciones con los datos y encontrando un polinomio en función de un  $D_3$  (diámetro de descarga) y velocidad específica  $N_s$ .

Cálculo  $D_3$ :

Para determinar el valor de  $D_3$ , se debe calcular el valor del coeficiente de velocidad periférica, que es una relación de la velocidad tangencial entre la velocidad de salida del fluido. La fórmula se obtiene mediante interpolación de datos de turbinas ya fabricadas.

$$\phi = 0,31 + (2,5 \times 10^{-3})N_s$$

Donde:

$\phi$  = coeficiente de velocidad periférica

$N_s$  = velocidad específica

$$\phi = 0,31 + (2,5 \times 10^{-3})(388,80)$$

$$\phi = 1,28$$

Al igual que la formula anterior, esta surge de la interpolación de datos de turbinas ya fabricadas.

$$D_3 = 84,50 \phi \sqrt{h}/N$$

Donde:

$D_3$  = diámetro de descarga

$\phi$  = coeficiente de velocidad periférica

$h$  = salto

$N$  = número de rpm

$$D_3 = 84,50 (1,28) \sqrt{20}/720$$

$$D_3 = 0,67 \text{ m}$$

A continuación, se presentan expresiones en función de  $D_3$  y  $N_s$  válidas para el dimensionamiento de los diámetros de entrada, medio, distancias de eje al distribuidor.

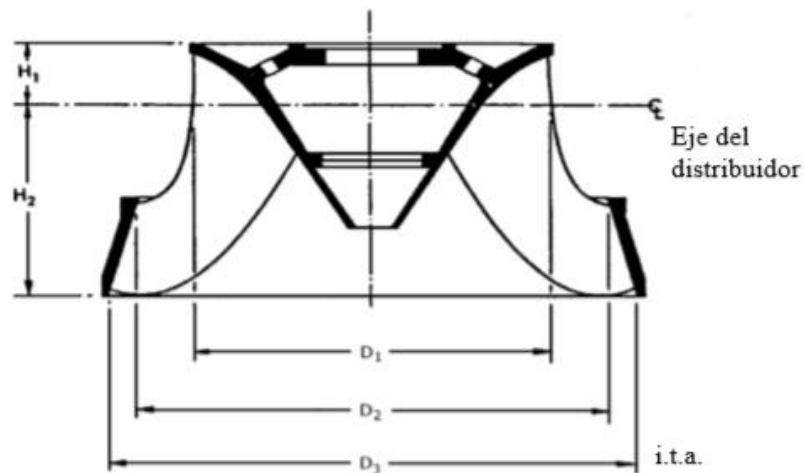
$$\text{Diámetro de entrada } (D_1): \quad \frac{D_1}{D_3} = 0,40 + (94,50/N_s)$$

$$\text{Diámetro medio } (D_2): \quad \frac{D_2}{D_3} = 1/(0,96 + 0,00038 N_s)$$

Distancia de  $D_1$  al eje del distribuidor:  $\frac{H_1}{D_3} = 0,094 + 0,00025 N_s$

Distancia del eje del distribuidor a  $D_3$ :  $\frac{H_2}{D_3} = 1 / (3,16 - 0,0013 N_s)$

Figura 44. Dimensiones para el rodete



Fuente: NAVA MASTACHE, Arturo. *Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas*. p. 133.

Cálculo diámetro de entrada  $D_1$ :

$$\frac{D_1}{D_3} = 0,40 + \left( \frac{94,50}{388,80} \right)$$

$$\frac{D_1}{D_3} = 0,64$$

$$D_1 = 0,64 D_3 = 0,64(0,67) = 0,43 \text{ m}$$

Cálculo diámetro de entrada  $D_2$ :

$$\frac{D_2}{D_3} = 1 / (0,96 + 0,00038 (388,80))$$

$$\frac{D_2}{D_3} = 1 / (0,96 + 0,00038 (388,80))$$

$$\frac{D_2}{D_3} = 0,90$$

$$D_2 = 0,90 D_3 = 0,90 (0,67) = 0,60 \text{ m}$$

Cálculo distancia de  $D_1$  al eje del distribuidor:

$$\frac{H_1}{D_3} = 0,094 + 0,00025 (388,80)$$

$$\frac{H_1}{D_3} = 0,19$$

$$H_1 = 0,19 D_3 = 0,19 (0,67) = 0,13 \text{ m}$$

Cálculo distancia del eje del distribuidor a  $D_3$ :

$$\frac{H_2}{D_3} = 1 / (3,16 - 0,0013 (388,80))$$

$$\frac{H_2}{D_3} = 0,38$$

$$H_2 = 0,38 D_3 = 0,38 (0,67) = 0,25 \text{ m}$$

Resultados:

Las dimensiones del rodete ideal para las turbinas Francis de la hidroeléctrica Chichaic son las siguientes:

Tabla XX. Dimensiones de rediseño para el rodete

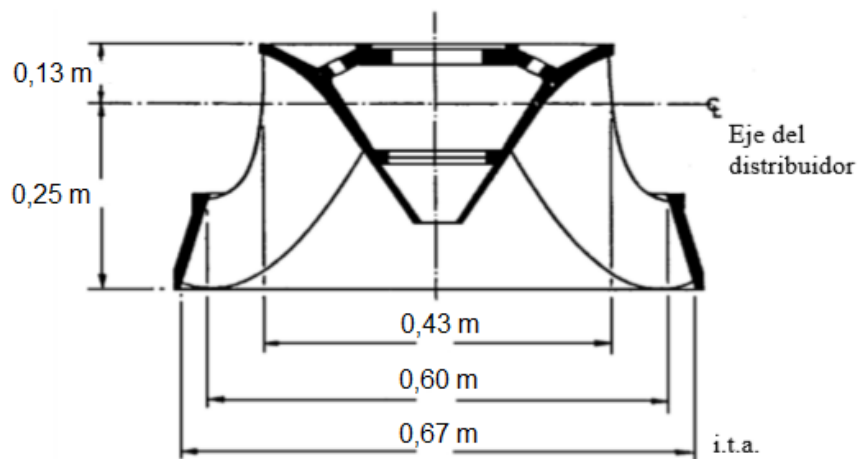
Dimensión a medir	Medida (m)
Diámetro de entrada $D_1$	0,43
Diámetro de entrada $D_2$	0,60

Continuación tabla XX.

Diámetro de descarga $D_3$	0,67
Distancia de $D_1$ al eje del distribuidor	0,13
Distancia del eje del distribuidor a $D_3$	0,25

Fuente: elaboración propia.

Figura 45. **Rediseño del rodete**



Fuente: elaboración propia.

Dimensionamiento de la carcasa:

Para determinar el tamaño de la carcasa o caracol se utilizan las siguientes expresiones, procedentes de interpolaciones de datos de turbinas fabricadas, siempre en función de  $N_s$  y  $D_3$ .

Tabla XXI. **Ecuaciones para el dimensionamiento de la carcasa**

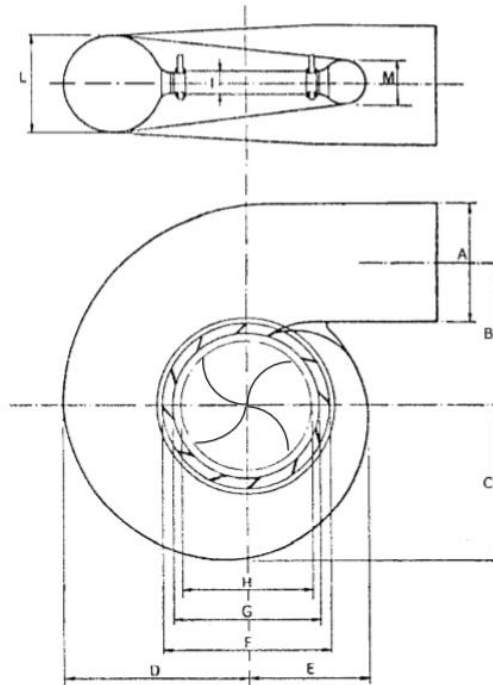
$A / D_3 = 1,20 - 19,56 / N_s$	$G / D_3 = 0,89 + 96,50 / N_s$
$B / D_3 = 1,10 + 54,80 / N_s$	$H / D_3 = 0,79 + 81,75 / N_s$
$C / D_3 = 1,32 + 49,25 / N_s$	$I / D_3 = 0,10 + 0,00065 N_s$

Continuación tabla XXI.

$D / D_3 = 1,50 + 48.80 / N_s$	$L / D_3 = 0,88 + 0,00049 N_s$
$E / D_3 = 0,98 + 63.60 / N_s$	$M / D_3 = 0,60 + 0,000015 / N_s$
$F / D_3 = 1,00 + 131.40 / N_s$	

Fuente: elaboración propia.

Figura 46. Dimensiones para la carcasa



Fuente: NAVA MASTACHE, Arturo. *Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas*. p. 133.



Tabla XXII. **Solución de ecuaciones para el dimensionamiento de la carcasa**

$A / D_3 = 1,20 - 19.56 / (388,80) = 1,15$ ; $A = 1,15 D_3 = 1,15 (0,67) = 0,77$ m
$B / D_3 = 1,10 + 54.80 / (388,80) = 1,24$ ; $B = 1,24 D_3 = 1,24 (0,67) = 0,83$ m
$C / D_3 = 1,32 + 49.25 / (388,80) = 1,45$ ; $C = 1,45 D_3 = 1,45 (0,67) = 0,97$ m
$D / D_3 = 1,50 + 48.80 / (388,80) = 1,62$ ; $D = 1,62 D_3 = 1,62 (0,67) = 1,09$ m
$E / D_3 = 0,98 + 63.60 / (388,80) = 1,14$ ; $E = 1,14 D_3 = 1,14 (0,67) = 0,76$ m
$F / D_3 = 1,00 + 131.40 / (388,80) = 1,34$ ; $F = 1,34 D_3 = 1,34 (0,67) = 0,90$ m
$G / D_3 = 0,89 + 96,50 / (388,80) = 1,14$ ; $G = 1,14 D_3 = 1,14 (0,67) = 0,76$ m
$H / D_3 = 0,79 + 81,75 / (388,80) = 1,00$ ; $H = 1,00 D_3 = 1,00 (0,67) = 0,67$ m
$I / D_3 = 0,10 + 0,00065 (388,80) = 0,35$ ; $I = 0,35 D_3 = 0,35 (0,67) = 0,23$ m
$L / D_3 = 0,88 + 0,00049 (388,80) = 1,07$ ; $L = 1,07 D_3 = 1,07 (0,67) = 0,72$ m
$M / D_3 = 0,60 + 0,000015 / (388,80) = 0,60$ ; $M = 0,60 D_3 = 0,60 (0,67) = 0,40$ m

Fuente: elaboración propia.

Resultados:

Las dimensiones de la carcasa ideal para las turbinas Francis de la hidroeléctrica Chichaic son las siguientes:

Tabla XXIII. **Dimensiones de rediseño para la carcasa**

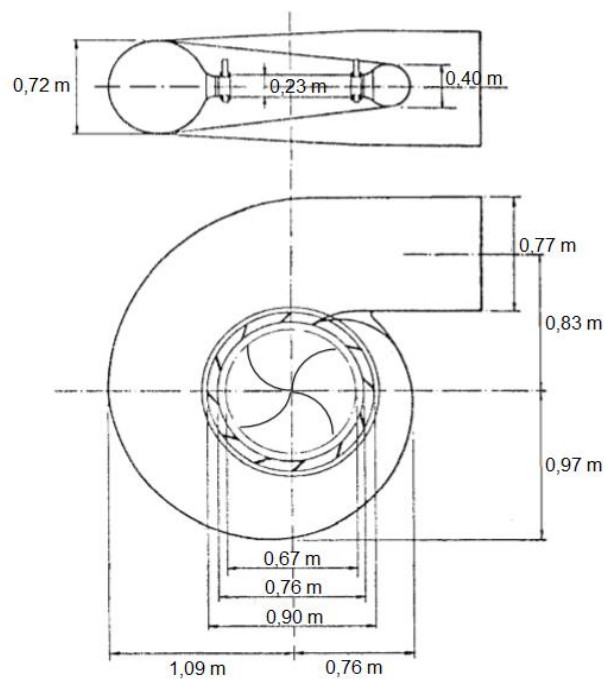
Sección	Medida (m)
Sección A	0,77

Continuación tabla XXIII.

Sección B	0,83
Sección C	0,97
Sección D	1,09
Sección E	0,76
Sección F	0,90
Sección G	0,76
Sección H	0,67
Sección I	0,23
Sección L	0,72
Sección M	0,40

Fuente: elaboración propia.

Figura 47. **Rediseño de la carcasa**



Fuente: elaboración propia.

Dimensionamiento tubo de aspiración:

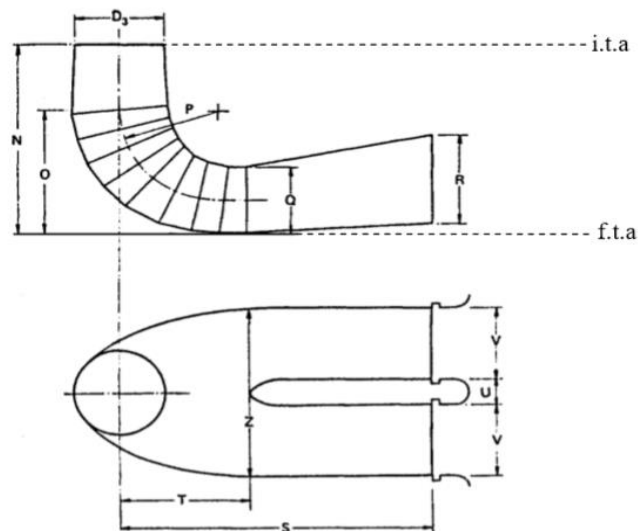
Al igual que la carcasa el dimensionamiento del tubo de aspiración se lleva a cabo de las siguientes expresiones, procedentes de interpolación de datos de diseño de turbinas fabricadas.

Tabla XXIV. **Ecuaciones para el dimensionamiento del tubo de aspiración**

$N / D_3 = 1,54 + 203,50 / N_s$	$S / D_3 = N_s / (-9,28 + 0,25 N_s)$
$O / D_3 = 0,83 + 140,70 / N_s$	$T / D_3 = 1,50 + 0,00019 N_s$
$P / D_3 = 1,37 - 0,00056 / N_s$	$U / D_3 = 0,51 + 0,0007 N_s$
$Q / D_3 = 0,58 + 22,60 / N_s$	$V / D_3 = 1,10 + 53,70 / N_s$
$R / D_3 = 1,6 - 0,0013 / N_s$	$Z / D_3 = 2,63 + 33,80 / N_s$

Fuente: elaboración propia.

Figura 48. **Dimensiones para el tubo de aspiración**



Fuente: NAVA MASTACHE, Arturo. *Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas*. p.133.

Tabla XXV. **Solución de ecuaciones para el dimensionamiento del tubo de aspiración**

$N / D_3 = 1,54 + 203,50 / (388,80) = 2,06$ $N / D_3 = 2,06; N = 2,06 D_3$ $N = 2,06 (0,67) = 1,38 \text{ m}$
$O / D_3 = 0,83 + 140,70 / (388,80) = 1,19$ $O / D_3 = 1,19; O = 1,19 D_3$ $O = 1,19 (0,67) = 0,79 \text{ m}$
$P / D_3 = 1,37 - 0,00056 / (388,80) = 1,37$ $P / D_3 = 1,37; P = 1,37 D_3$ $P = 1,37 (0,67) = 0,92 \text{ m}$
$Q / D_3 = 0,58 + 22,60 / (388,80) = 0,64$ $Q / D_3 = 0,64; Q = 0,64 D_3$ $Q = 0,64 (0,67) = 0,43 \text{ m}$
$R / D_3 = 1,60 - 0,0013 / (388,80) = 1,60$ $R / D_3 = 1,60; R = 1,60 D_3$ $R = 1,60 D_3 = 1,60 (0,67) = 1,07 \text{ m}$
$S / D_3 = (388,80) / (-9,28 + 0,25 (388,80)) = 4,42$ $S / D_3 = 4,42; S = 4,42 D_3$ $S = 4,42 (0,67) = 2,96 \text{ m}$
$T / D_3 = 1,50 + 0,00019 (388,80) = 1,57$ $T / D_3 = 1,57; T = 1,57 D_3$ $T = 1,57 (0,67) = 1,05 \text{ m}$
$U / D_3 = 0,51 + 0,0007 (388,80) = 0,78$ $U / D_3 = 0,78; U = 0,78 D_3$ $U = 0,78 (0,67) = 0,52 \text{ m}$
$V / D_3 = 1,10 + 53,70 / (388,80) = 1,24$ $V / D_3 = 1,24; V = 1,24 D_3$ $V = 1,24 (0,67) = 0,83 \text{ m}$
$Z / D_3 = 2,63 + 33,80 / (388,80) = 2,72$ $Z / D_3 = 2,72; Z = 2,72 D_3$ $Z = 2,72 (0,67) = 1,82 \text{ m}$

Fuente: elaboración propia.

Resultados:

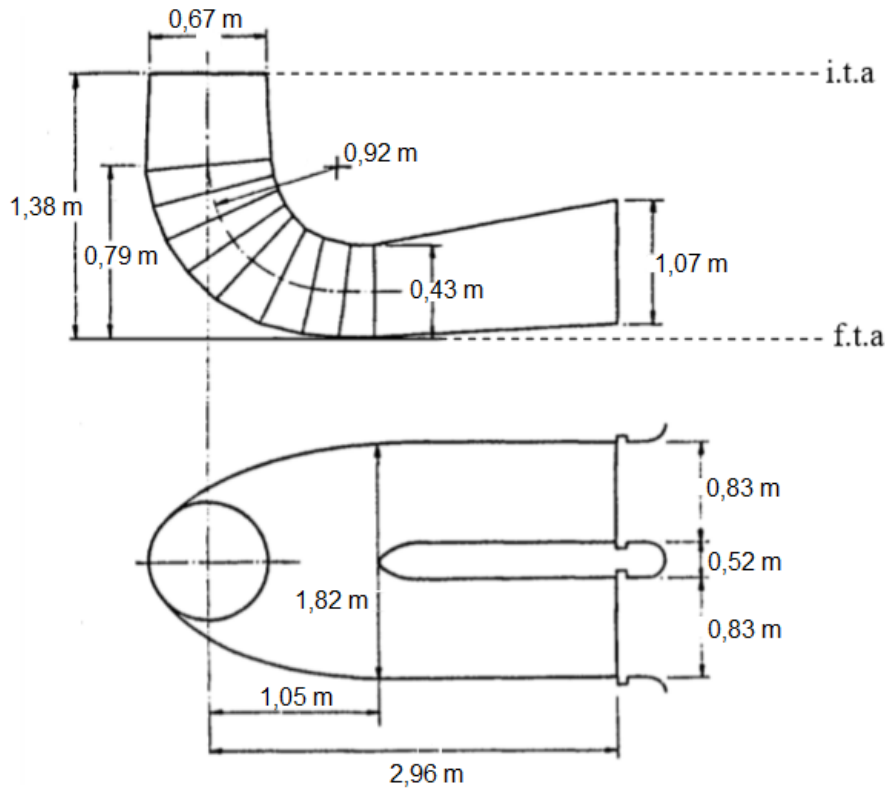
Las dimensiones de la tubería de aspiración ideal para las turbinas Francis de la hidroeléctrica Chichaic son las siguientes:

Tabla XXVI. **Dimensiones de rediseño para la tubería de aspiración**

<b>Sección</b>	<b>Medida (m)</b>
Sección N	1,38
Sección O	0,79
Sección P	0,92
Sección Q	0,43
Sección R	1,07
Sección S	2,96
Sección T	1,05
Sección U	0,52
Sección V	0,83
Sección Z	1,82

Fuente: elaboración propia.

Figura 49. Rediseño para el tubo de aspiración



Fuente: elaboración propia.

Se recomienda la implementación de un acero inoxidable para el rediseño de cada uno de estos elementos, incluyendo el rodete, por las propiedades mecánicas del material y su uso en la construcción de turbinas hidráulicas, los modelos 3D de esos elementos rediseñados se encuentran en la sección de apéndices de este documento.

### 3.3. Cotización del rediseño

La cotización de equipos de esta magnitud resulta un poco compleja ya que existen infinidad de proveedores y precios, además encontrar unas turbinas iguales a la diseñadas puede ser complicado. Por ende, para este apartado se

asignó un presupuesto entre Q. 4 000 000,00 y Q. 6 000 000,00 englobando de esta manera las dos turbinas Francis con sus respectivos generadores. El precio varía por la calidad de los equipos, por el lugar de fabricación, transporte, pago de impuesto incluso montaje de los equipos, asesorías y otros gastos que puedan darse.

Otra razón por la cual no se puede establecer un presupuesto fijo es que el INDE trabaja con licitaciones, es decir, el INDE da a conocer públicamente sus necesidades para que los proveedores puedan presentar su propuesta. Y en este caso el INDE no ha habilitado un evento de este tipo ya que se encuentra en fase de estudio.

Se cotizó por medio de una página web dedicada a la compra y venta de todo tipo de equipos y accesorios, el precio de una turbina Francis con sus respectivos generadores, en dicha página se encuentran diversidad de empresas que se dedican a la fabricación y comercialización de estos equipos, se contactó con una empresa China que se dedica a la fabricación de turbinas la cual tiene un precio base de \$ 145 435. Dicho precio varía según las especificaciones que brinde el solicitante, características de salto, caudales, material, tipo de rodete entre otras.

Por estas razones se estima un precio de \$ 250 000 por turbina con su generador. Además, dicho gasto comprende estudio y diseño, servicios, instalación, puesta en operación, gestión y mantenimiento.

Para traer estos equipos a Guatemala se necesita contratar a una empresa encargada del transporte, el precio de esto depende de si es vía aérea o marítima, el tamaño del embalaje, incluso el tiempo estimado de entrega. El costo estimado de esto es alrededor de \$ 3 500 utilizando la vía marítima.

Para ingresar dichos equipos al país es necesario cancelar cargos por nacionalización y aduana. Se trabaja a partir de un valor CIF (*Cost Insurance and Freight*), costo, seguro y flete. Y el valor FOB (*Free on Board*), libre a bordo, que se refiere al valor de los productos en su lugar de origen. Sumado a esto debe cancelarse el IVA sobre el valor CIF. Debería cancelarse un valor de arancel, pero gracias al programa de desgravación arancelaria, las turbinas hidráulicas y equipos accesorios están en la categoría A, categoría en la cual quedan libres de pagarse aranceles aduaneros.

Tabla XXVII. **Cotización turbinas y generadores**

<b>Cálculo valor CIF (\$)</b>	
Valor FOB (precio de 2 turbinas y 2 generadores)	500 000
Transporte	3 500
Seguro 2.2%	11 000
Valor CIF	514 500
<b>Cálculo de impuestos (\$)</b>	
Arancel sobre valor CIF	0
IVA sobre arancel	0
IVA sobre valor CIF	61 740
<b>Cálculo total (\$)</b>	
Total, valor CIF + impuestos	576 240
<b>Cálculo total (Q)</b>	
Total, valor CIF + impuestos	4 437 048

Fuente: elaboración propia.

Como se desglosó anteriormente el precio de esa cotización ronda alrededor de más de 4 millones de quetzales, pero tomando en cuenta diferentes propuestas, marcas, proveedores es aceptable el presupuesto propuesto en el principio de este apartado.



### 3.4. Análisis costo-beneficio

Para estimar si el rediseño de la hidroeléctrica es rentable se hará el siguiente análisis costo beneficio, iniciando con el periodo de retorno de la inversión.

En el apartado anterior se asignó un costo de rediseño entre Q. 4 000 000 y Q. 6 000 000 que incluye el coste de las dos turbinas con sus respectivos generadores para poder determinar el periodo de retorno de esta inversión se hará lo siguiente:

Se tomará como costo la cifra más alta, en este caso Q. 6 000 000, para cubrir esta cantidad se tomará en cuenta el valor de ingresos anuales por generación de energía llevando a cabo el rediseño. Para estimar este valor de manera de no sobredimensionar los ingresos se trabajará con el caudal promedio de la siguiente tabla y el valor promedio de precio por MWh generado.

Tabla XXVIII. Caudal promedio para generación de energía

Mes	Caudal m <sup>3</sup> /s
Enero	5,24
Febrero	4,35
Marzo	3,62
Abril	2,50
Mayo	2,66
Junio	5,54
Julio	6,77
Agosto	8,18
Septiembre	9,78
Octubre	10,51
Noviembre	8,29
Diciembre	6,96
Promedio	6,20

Fuente: INDE.

La tabla anterior hace referencia al promedio de caudales mensuales a lo largo de 23 años de registros de estos, mencionado antes en la sección de hidrología.

Cálculo de la potencia:

Con el caudal de 6,20 m<sup>3</sup>/s se procede a calcular la potencia de la hidroeléctrica.

$$P = 9,81 Q h R_t R_g$$
$$P = 9,81 (6,20) (20)(0,95)(0,90)$$
$$P = 1 040,05 \text{ kW}$$

Cálculo potencia generada anual:

La hidroeléctrica tiene alrededor de 6 430 horas operables al año, entonces la generación anual sería:

$$\text{Generación anual} = (1 040,05 \text{ kW})(6 430 \text{ h})$$

$$\text{Generación anual} = 6 687 521,50 \text{ kWh}$$

$$\text{Generación anual} = 6 687,52 \text{ MWh}$$

$$\text{Generación mensual} = 6 687,52 \text{ MWh} / 12$$

$$\text{Generación mensual} = 557,30 \text{ MWh}$$

Cálculo promedio precio por MWh generado:

Para estimar un precio de MWh generado se usará el valor promedio de la siguiente tabla que hace referencia al precio de los últimos 5 años.

Tabla XXIX. **Precio por megavatio hora generado últimos 5 años**

<b>Año</b>	<b>Precio por megavatio hora generado (\$)</b>
Año 2018	62,46
Año 2017	51,38
Año 2016	51,75
Año 2015	71,08
Año 2014	103,61
Promedio	68,05

Fuente: elaboración propia.

Cálculo ingresos anuales proyectados:

Ingresos anuales = generación anual \* precio por MWh promedio

Ingresos anuales = (6 687,52 MWh) \* (\$ 68,05 /MWh)

Ingresos anuales = \$ 455 085,74

Realizando el cambio de moneda (1 dólar = Q.7,70), obtenemos un valor de Q. 3 504 160,20 de ingresos en generación con el rediseño de la hidroeléctrica.

Cálculo retorno de inversión:

Para determinar el tiempo de retorno de la inversión se divide la cantidad invertida sobre las ganancias obtenidas por la inversión al año.

Tiempo retorno de inversión = costo de inversión / ingresos

Tiempo retorno de inversión = 6 000 000 / 3 504 160,20

Tiempo retorno de inversión = 1,71 años

Cabe destacar que no se tomaron en cuenta gastos de mantenimiento, operación u otros que afecten de manera negativa los ingresos anuales, pero a la vez los ingresos anuales pueden aumentar puesto que dependen del caudal y el valor del precio por megavatio hora generado. Según la ecuación el tiempo de retorno de inversión corresponde casi a dos años, pero tomando en cuenta lo anterior se puede estimar como tiempo de retorno de inversión como máximo 3 años.

En conclusión, el costo de invertir Q. 6 000 000 en el rediseño de la hidroeléctrica es recuperable en menos de 3 años y trae consigo los siguientes beneficios: equipo moderno y adecuado para la capacidad de la hidroeléctrica, menos paros por mantenimiento, menor costo de operación ya que con caudales bajos se puede operar solo con una, mayor capacidad de generación, incremento de ingresos por generación y ampliación del rango de cobertura de la demanda energética de la región.

## 4. FASE DE DOCENCIA

La finalidad de este apartado es capacitar al personal para la aplicación de mantenimiento predictivo a través de inspección VOSO para las turbinas Francis actuales, en caso no se pueda llevar a cabo la adquisición de otras nuevas.

### 4.1. Condiciones de trabajo de equipo e instrumentación

Todo elemento que compone un equipo o sistema tiene rangos de operación, es decir, existe un límite de temperatura, velocidad, presión, entre otras magnitudes físicas a las que pueden operar de manera eficiente y sin provocar fallos.

En una turbina Francis esto no es excepción, los elementos mecánicos que la componen dependen de la presión a la que se someten, temperatura de trabajo y una buena lubricación. Para determinar si se está trabajando en el rango de operación adecuado es necesaria la instrumentación. La instrumentación ayuda a identificar los valores de presión, temperatura y cantidad de aceite. Actualmente las turbinas tienen los siguientes rangos de operación:

Tabla XXX. Rangos de operación turbinas Francis

Variable	Instrumento	Rango
Presión	Manómetro	(0,0 – 2,0) kg/cm <sup>2</sup>
	Vacuómetros	(0,0 – 0,3) kg/cm <sup>2</sup>
Temperatura	Termómetro	(30 – 45) °C
Lubricación	Indicadores de nivel	Mantenerse arriba del mínimo

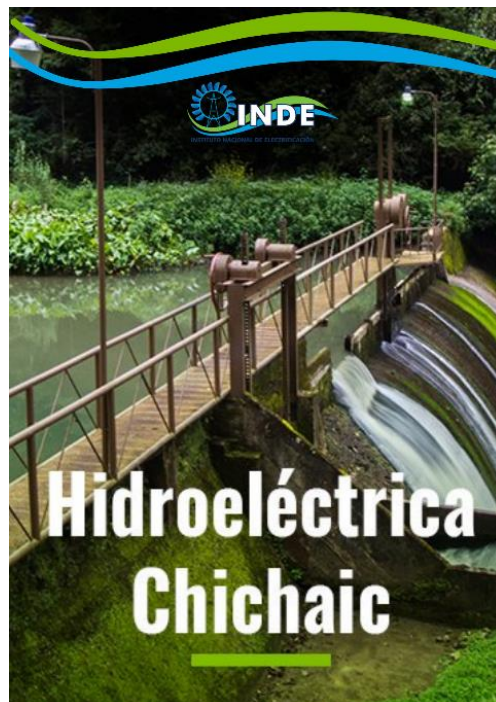
Fuente: elaboración propia.

## 4.2. Manual de monitoreo

En base a los rangos de operación descritos anteriormente y técnicas que se utilizan para el monitoreo de turbinas Francis se realizó el siguiente manual de monitoreo, el cual está en la sección de apéndices de este documento.

El manual de monitoreo se centra en la aplicación de técnicas VOSO (ver, oír, sentir y oler), técnica basada en el uso de los sentidos humanos para la detección de fallas en los equipos. La aplicación de las técnicas VOSO se divide en tres áreas: área térmica, área tribológica y área de vibraciones.

Figura 50. **Portada manual de monitoreo**

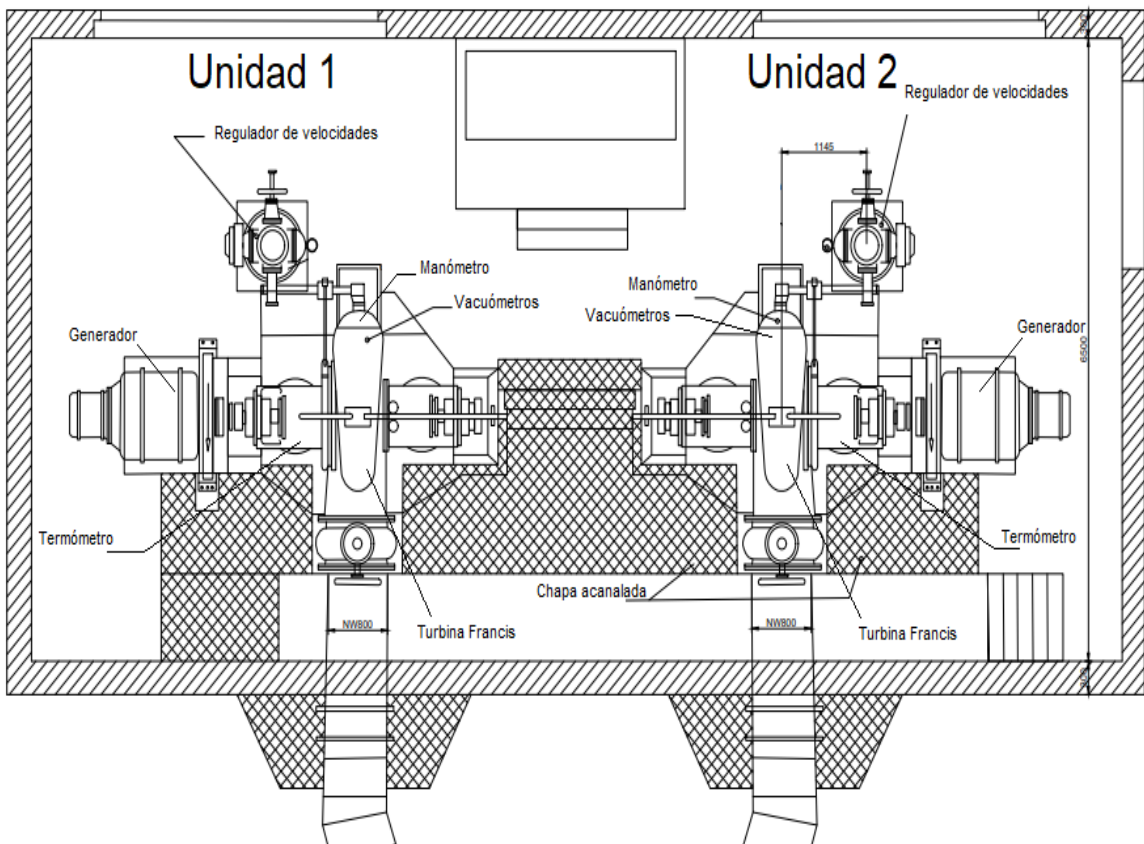


Fuente: elaboración propia.

### 4.3. Ruta de monitoreo

La ruta de monitoreo hace referencia a la ubicación física de los componentes a monitorear, en este caso a las turbinas Francis y a su instrumentación.

Figura 51. Ruta de monitoreo



Fuente: INDE.

#### **4.4. Capacitación**

La capacitación tiene como objetivo establecer una forma de monitorear las turbinas, en cuanto al procedimiento consiste en darles a los operadores el manual de monitoreo, para que les sirva como documento de apoyo al realizar tareas de inspección a las turbinas y detectar posibles fallas.



## CONCLUSIONES

1. Las características físicas y químicas del río Cahabón lo clasifican como río de agua dura, por su alto contenido de minerales como calcio y magnesio, la presencia de estos minerales se atribuye a la composición del subsuelo donde se ubica la hidroeléctrica, el cual está compuesto por roca caliza, a su vez el río presenta gran cantidad de sólidos disueltos. Todas estas características representan un riesgo de erosión para las turbinas, a pesar de esto el río Cahabón mantiene caudales aptos para generación de energía a lo largo de todo el año.
2. Actualmente todos los elementos que conforman la hidroeléctrica están en buen estado a excepción de las turbinas, en las cuales los rodets de ambas presentan erosión, razón por la cual se produce un desbalance al momento de girar produciendo vibraciones, las cuales por prevención terminan en la reducción de carga y disminución de la energía generada, desaprovechando las capacidades hídricas de la hidroeléctrica.
3. Mediante la proyección de energía generada basándose en la de 2018, año con menor producción de energía y año de operación reciente, se demostró que actualmente con los caudales obtenidos a lo largo de ese año, se pudo generar alrededor del triple de energía y de ingresos, razón por la cual es conveniente llevar a cabo el rediseño.
4. En la sección de propuesta de rediseño de este documento se establecen las dimensiones adecuadas de las turbinas Francis para la hidroeléctrica, se determinó que esta tiene una potencia promedio de 1040 kW, razón por

la cual es necesaria la adquisición de dos generadores de al menos 750 kW.

5. Según la proyección realizada en la sección de análisis costo beneficio se determinó un promedio de generación anual llevando a cabo el rediseño de 6 687 kW, cifra nunca alcanzada por la hidroeléctrica, por lo tanto, se estiman ingresos superiores a 3 millones de quetzales anuales, que recuperarían la inversión de 6 millones de quetzales en menos de 3 años y trae muchos beneficios a la hidroeléctrica.
6. El método elegido para identificar fallas potenciales es la aplicación del mantenimiento predictivo con técnicas VOSO, capacitando a los operadores con un manual el cual describa las actividades por realizar para llevar a cabo un monitoreo y evaluación adecuado.

## RECOMENDACIONES

Al Instituto Nacional de Electrificación INDE

1. Llevar a cabo el cambio de equipos: turbinas y generadores para aprovechar al máximo los caudales que brinda el río Cahabón para la generación de energía.

Al jefe de planta

2. De ser posible, la adquisición de los nuevos equipos y dar a conocer al proveedor las características fisicoquímicas del río Cahabón para obtener una correcta asesoría.
3. En dado caso no sea posible adquirir nuevos equipos se recomienda cambiar el material del rodete y alavés, ya que no poseen la resistencia mecánica adecuada.
4. Realizar más estudios sobre la condición actual de la hidroeléctrica para obtener diferentes puntos de vista y llevar a cabo las acciones necesarias para el eficiente funcionamiento de esta.
5. Realizar más estudios económicos sobre las ganancias en generación de energía para tener proyecciones adecuadas que ayuden en la toma de decisiones al momento de invertir.

Al supervisor de mantenimiento mecánico:

6. Establecer un plan de mantenimiento predictivo haciendo uso de los equipos de vibraciones y termografía con los que cuenta la institución para pronosticar fallas en las turbinas.
7. Capacitar a parte del personal para que lleven a cabo las tareas de mantenimiento predictivo y realizarlas con mayor frecuencia para reconocer fallas de manera prematura y realizar las acciones correspondientes.

## BIBLIOGRAFÍA

1. CHÁVEZ ROSALES, Vinicio Enrique. *Reacondicionamiento de turbina Francis de hidroeléctrica Zunil municipalidad de Quetzaltenango*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2013. 60 p.
2. Experto en turbinas hidráulicas. *Cálculo de una turbina hidráulica*. [en línea]. <[https://turbinashidraulica.blogspot.com/2010/03/?fbclid=IwAR1fxyF5KJKPzK85L4D4PimOQO3HotaNtxz3qrcZfiulqCE\\_lwVA9B-Kl8](https://turbinashidraulica.blogspot.com/2010/03/?fbclid=IwAR1fxyF5KJKPzK85L4D4PimOQO3HotaNtxz3qrcZfiulqCE_lwVA9B-Kl8)>. [Consulta: 20 de junio de 2019].
3. FIGUEROA GARCÍA, Daniel Ángel. *Implementación de un plan de inspección y reparación por soldadura de rodetes Pelton, para la planta Hidroeléctrica Aguacapa*. Trabajo de graduación de Maestro en artes de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2019. 126 p.
4. \_\_\_\_\_. *Propuesta de repotenciación de generadores por medio del rediseño y cambio de aislante*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánico Electricista. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2013. 70 p.
5. INDE. *Manual de operación mantenimiento y vigilancia*. Municipio de Cobán, departamento de Alta Verapaz, 2016. 33 p.

6. \_\_\_\_\_. *Plan de preparación ante emergencias*. Municipio de Cobán, Departamento de Alta Verapaz, 2015. 38 p.
7. \_\_\_\_\_. *Resultados del censo 2018*. [en línea].<<https://www.censopoblacion.gt/explorador>>. [Consulta: 10 de noviembre de 2019].
8. INSIVUMEH. *Calidad del agua*. [en línea].<[http://insivumeh.gob.gt/hidrologia/Calidad\\_del\\_Agua/Boletín%20calidad%20del%20agua%20No%2021\\_2018.pdf](http://insivumeh.gob.gt/hidrologia/Calidad_del_Agua/Boletín%20calidad%20del%20agua%20No%2021_2018.pdf)>. [Consulta: 18 de octubre de 2019].
9. \_\_\_\_\_. *Hidrología ríos de Guatemala*. [en línea]. <[http://www.insivumeh.gob.gt/98uatemala98/98uat\\_de\\_guatemala.htm](http://www.insivumeh.gob.gt/98uatemala98/98uat_de_guatemala.htm)>. [Consulta: 15 de abril de 2019].
10. LOMBARDI. *Estudio de seguridad de presa norma NSP (C.N.E.E.)*. Presa Chichaic, 2012. 119 p.
11. NAVA MASTACHE, Arturo. *Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas*. México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2013. 113 p.
12. RIVERA GUIROLA, Guillermo Rodolfo. *Reacondicionamiento de los álabes directrices de una turbina hidráulica tipo Francis en hidroeléctrica los esclavos y su análisis de costos*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánico. Universidad de San Carlos de

Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2009. 41 p.





## APÉNDICES

### Apéndice 1. Cálculo proyección mensual energía generada año 2018.

Febrero 2018:

Se generaron 194 208 kWh en el mes aproximadamente 194 MWh al mes, con un caudal promedio de 7,40 m<sup>3</sup>/s.

Se pudo generar  $P = 9\,810 (7,40) (20) (0,90) (0,95) = 1\,241,36$  kW.

Haciendo la prolongación de la potencia generada por horas al mes, se obtiene:

$$\text{Producción mensual} = (1\,241,36 \text{ kW}) \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} = 893\,779,20 \text{ kWh al mes}$$

Aproximadamente 893,78 MWh.

Marzo 2018:

Se generaron 167 878,20 kWh en el mes aproximadamente 168 MWh al mes, con un caudal promedio de 4,77 m<sup>3</sup>/s.

Se pudo generar  $P = 9\,810 (4,77) (20) (0,90) (0,95) = 800,17$  kW.

Haciendo la prolongación de la potencia generada por horas al mes, se obtiene:

$$\text{Producción mensual} = (800,17 \text{ kW}) \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} = 576\,122,40 \text{ kWh al mes}$$

Continuación apéndice 1.

Aproximadamente 576,12 MWh.

Abril 2018:

Se generaron 145 769,40 kWh en el mes aproximadamente 146 MWh al mes, con un caudal promedio de 4,04 m<sup>3</sup>/s.

Se pudo generar  $P = 9\ 810 (4,04) (20) (0,90) (0,95) = 677,71\text{ kW}$ .

Haciendo la prolongación de la potencia generada por horas al mes, se obtiene:

$$\text{Producción mensual} = (677,71\text{ kW}) \frac{24\text{ horas}}{1\text{ día}} \frac{30\text{ días}}{\text{mes}} = 487\ 951,20\text{ kWh al mes}$$

Aproximadamente 487,95 MWh.

Mayo 2018:

Se generaron 115 046,40 kWh en el mes aproximadamente 115 MWh al mes, con un caudal promedio de 4,23 m<sup>3</sup>/s.

Se pudo generar  $P = 9\ 810 (4,23) (20) (0,90) (0,95) = 709,59\text{ kW}$ .

Haciendo la prolongación de la potencia generada por horas al mes, se obtiene:

$$\text{Producción mensual} = (709,59\text{ kW}) \frac{24\text{ horas}}{1\text{ día}} \frac{30\text{ días}}{\text{mes}} = 510\ 904,80\text{ kWh al mes}$$

Aproximadamente 510,90 MWh.

Continuación apéndice 1.

Junio 2018:

Se generaron 98 826 kWh en el mes aproximadamente 99 MWh al mes, con un caudal promedio de 7,95 m<sup>3</sup>/s.

Se pudo generar  $P = 9\,810 (7,95) (20) (0,90) (0,95) = 1\,333,62$  kW.

Haciendo la prolongación de la potencia generada por horas al mes, se obtiene:

$$\text{Producción mensual} = (1\,333,62 \text{ kW}) \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} = 960\,206,40 \text{ kWh al mes}$$

Aproximadamente 960,21 MWh.

Julio 2018:

Se generaron 141 145,20 kWh en el mes aproximadamente 141 MWh al mes, con un caudal promedio de 6,85 m<sup>3</sup>/s.

Se pudo generar  $P = 9\,810 (6,85) (20) (0,90) (0,95) = 1\,149,09$  kW.

Haciendo la prolongación de la potencia generada por horas al mes, se obtiene:

$$\text{Producción mensual} = (1\,149,09 \text{ kW}) \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} = 827\,344,80 \text{ kWh al mes}$$

Aproximadamente 827,34 MWh.

Continuación apéndice 1.

Agosto 2018:

Se generaron 192 175,20 kWh en el mes aproximadamente 192 MWh al mes, con un caudal promedio de 4,88 m<sup>3</sup>/s.

Se pudo generar  $P = 9\,810 (4,88) (20) (0,90) (0,95) = 818,62 \text{ kW}$ .

Haciendo la prolongación de la potencia generada por horas al mes, se obtiene:

$$\text{Producción mensual} = (818,62 \text{ kW}) \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} = 589\,406,40 \text{ kWh al mes}$$

Aproximadamente 589,41 MWh.

Septiembre 2018:

Se generaron 148 440,60 kWh en el mes aproximadamente 148 MWh al mes, con un caudal promedio de 6,33 m<sup>3</sup>/s.

Se pudo generar  $P = 9\,810 (6,33) (20) (0,90) (0,95) = 1\,061,86 \text{ kW}$ .

Haciendo la prolongación de la potencia generada por horas al mes, se obtiene:

$$\text{Producción mensual} = (1\,061,86 \text{ kW}) \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} = 764\,539,20 \text{ kWh al mes}$$

Aproximadamente 764,53 MWh.

Continuación apéndice 1.

Octubre 2018:

Se generaron 112 887,60 kWh en el mes aproximadamente 113 MWh al mes, con un caudal promedio de 9,26 m<sup>3</sup>/s.

Se pudo generar  $P = 9\,810 (9,26) (20) (0,90) (0,95) = 1\,553,37$  kW.

Haciendo la prolongación de la potencia generada por horas al mes, se obtiene:

$$\text{Producción mensual} = (1\,553,37 \text{ kW}) \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} = 1\,118\,426 \text{ kWh al mes}$$

Aproximadamente 1 118,42 MWh.

Noviembre 2018:

Se generaron 110 812,80 kWh en el mes aproximadamente 111 MWh al mes, con un caudal promedio de 5,79 m<sup>3</sup>/s.

Se pudo generar  $P = 9\,810 (5,79) (20) (0,90) (0,95) = 971,28$  kW.

Haciendo la prolongación de la potencia generada por horas al mes, se obtiene:

$$\text{Producción mensual} = (971,28 \text{ kW}) \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} = 699\,321,60 \text{ kWh al mes}$$

Aproximadamente 699,32 MWh.

Continuación apéndice 1.

Diciembre 2018:

Se generaron 116 344,20 kWh en el mes aproximadamente 116 MWh al mes, con un caudal promedio de 3,59 m<sup>3</sup>/s.

Se pudo generar  $P = 9\,810 (3,59) (20) (0,90) (0,95) = 602,23 \text{ kW}$ .

Haciendo la prolongación de la potencia generada por horas al mes, se obtiene:

$$\text{Producción mensual} = (602,23 \text{ kW}) \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} = 433\,605,60 \text{ kWh al mes}$$

Aproximadamente 433,61 MWh.

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 2. Cálculo potencial hidrológico rediseño de la hidroeléctrica.

Febrero:

Tiene un caudal promedio de 4,35 m<sup>3</sup>/s, en el cual se pueden generar:

$$P = 9\ 810 (4,35) (20) (0,90) (0,95) = 729,72 \text{ kW.}$$

Haciendo la prolongación de la potencia generada por horas al mes, se obtiene:

$$\text{Producción mensual} = (729,72 \text{ kW}) \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} = 525\ 396 \text{ kWh al mes}$$

Aproximadamente 525,39 MWh.

Marzo:

Tiene un caudal promedio de 3,62 m<sup>3</sup>/s, en el cual se pueden generar:

$$P = 9\ 810 (3,62) (20) (0,90) (0,95) = 607,26 \text{ kW.}$$

Haciendo la prolongación de la potencia generada por horas al mes, se obtiene:

$$\text{Producción mensual} = (607,26 \text{ kW}) \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} = 437\ 226 \text{ kWh al mes}$$

Aproximadamente 437,22 MWh.

Continuación apéndice 2.

Abril:

Tiene un caudal promedio de 2,50 m<sup>3</sup>/s, en el cual se pueden generar:

$$P = 9\,810 (2,25) (20) (0,90) (0,95) = 419,37 \text{ kW.}$$

Haciendo la prolongación de la potencia generada por horas al mes, se obtiene:

$$\text{Producción mensual} = (419,37 \text{ kW}) \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} = 301\,951 \text{ kWh al mes}$$

Aproximadamente 301,95 MWh.

Mayo:

Tiene un caudal promedio de 2,66 m<sup>3</sup>/s, en el cual se pueden generar:

$$P = 9\,810 (4,35) (20) (0,90) (0,95) = 446,21 \text{ kW.}$$

Haciendo la prolongación de la potencia generada por horas al mes, se obtiene:

$$\text{Producción mensual} = (446,21 \text{ kW}) \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} = 321\,276 \text{ kWh al mes}$$

Aproximadamente 321,27 MWh.



Continuación apéndice 2.

Junio:

Tiene un caudal promedio de 5,54 m<sup>3</sup>/s, en el cual se pueden generar:

$$P = 9\ 810 (5,54) (20) (0,90) (0,95) = 929,34 \text{ kW.}$$

Haciendo la prolongación de la potencia generada por horas al mes, se obtiene:

$$\text{Producción mensual} = (929,34 \text{ kW}) \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} = 669\ 125 \text{ kWh al mes}$$

Aproximadamente 669,12 MWh.

Julio:

Tiene un caudal promedio de 6,77 m<sup>3</sup>/s, en el cual se pueden generar:

$$P = 9\ 810 (6,77) (20) (0,90) (0,95) = 1\ 135,67 \text{ kW.}$$

Haciendo la prolongación de la potencia generada por horas al mes, se obtiene:

$$\text{Producción mensual} = (1\ 135,67 \text{ kW}) \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} = 817\ 685 \text{ kWh al mes}$$

Aproximadamente 817,68 MWh.

Continuación apéndice 2.

Agosto:

Tiene un caudal promedio de 8,18 m<sup>3</sup>/s, en el cual se pueden generar:

$$P = 9\ 810 (8,18) (20) (0,90) (0,95) = 1\ 372,20 \text{ kW.}$$

Haciendo la prolongación de la potencia generada por horas al mes, se obtiene:

$$\text{Producción mensual} = (1\ 372,20 \text{ kW}) \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} = 987\ 986 \text{ kWh al mes}$$

Aproximadamente 987,98 MWh.

Septiembre:

Tiene un caudal promedio de 9,78 m<sup>3</sup>/s, en el cual se pueden generar:

$$P = 9\ 810 (9,78) (20) (0,90) (0,95) = 1\ 640,60 \text{ kW.}$$

Haciendo la prolongación de la potencia generada por horas al mes, se obtiene:

$$\text{Producción mensual} = (1\ 640,60 \text{ kW}) \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} = 1\ 181\ 235 \text{ kWh al mes}$$

Aproximadamente 1 181,23 MWh.

Continuación apéndice 2.

Octubre:

Tiene un caudal promedio de 10,51 m<sup>3</sup>/s, en el cual se pueden generar:

$$P = 9\,810 (10,51) (20) (0,90) (0,95) = 1\,763,06 \text{ kW.}$$

Haciendo la prolongación de la potencia generada por horas al mes, se obtiene:

$$\text{Producción mensual} = (1\,763,06 \text{ kW}) \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} = 1\,269\,405 \text{ kWh al mes}$$

Aproximadamente 1 269,40 MWh.

Noviembre:

Tiene un caudal promedio de 8,29 m<sup>3</sup>/s, en el cual se pueden generar:

$$P = 9\,810 (8,29) (20) (0,90) (0,95) = 1\,390,65 \text{ kW.}$$

Haciendo la prolongación de la potencia generada por horas al mes, se obtiene:

$$\text{Producción mensual} = (1\,390,65 \text{ kW}) \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} = 1\,001\,272 \text{ kWh al mes}$$

Aproximadamente 1 001,27 MWh.

Continuación apéndice 2.

Diciembre:

Tiene un caudal promedio de 6,96 m<sup>3</sup>/s, en el cual se pueden generar:

$$P = 9\,810 (6,96) (20) (0,90) (0,95) = 1\,167,54 \text{ kW.}$$

Haciendo la prolongación de la potencia generada por horas al mes, se obtiene:

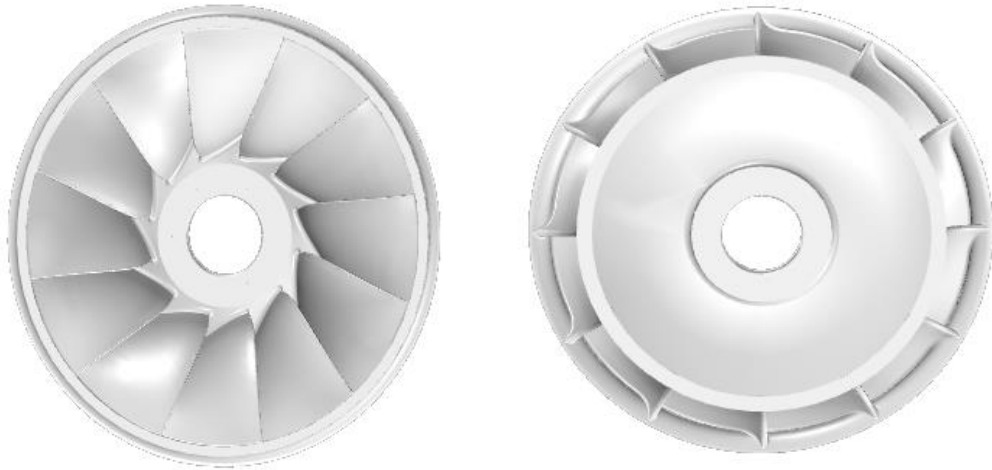
$$\text{Producción mensual} = (1\,167,54 \text{ kW}) \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} = 840\,633 \text{ kWh al mes}$$

Aproximadamente 840,63 MWh.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Modelado 3D del rodete.**

Vista frontal y trasera del rodete



Vista perfil y perspectiva del rodete



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Modelado 3D de la carcasa.**

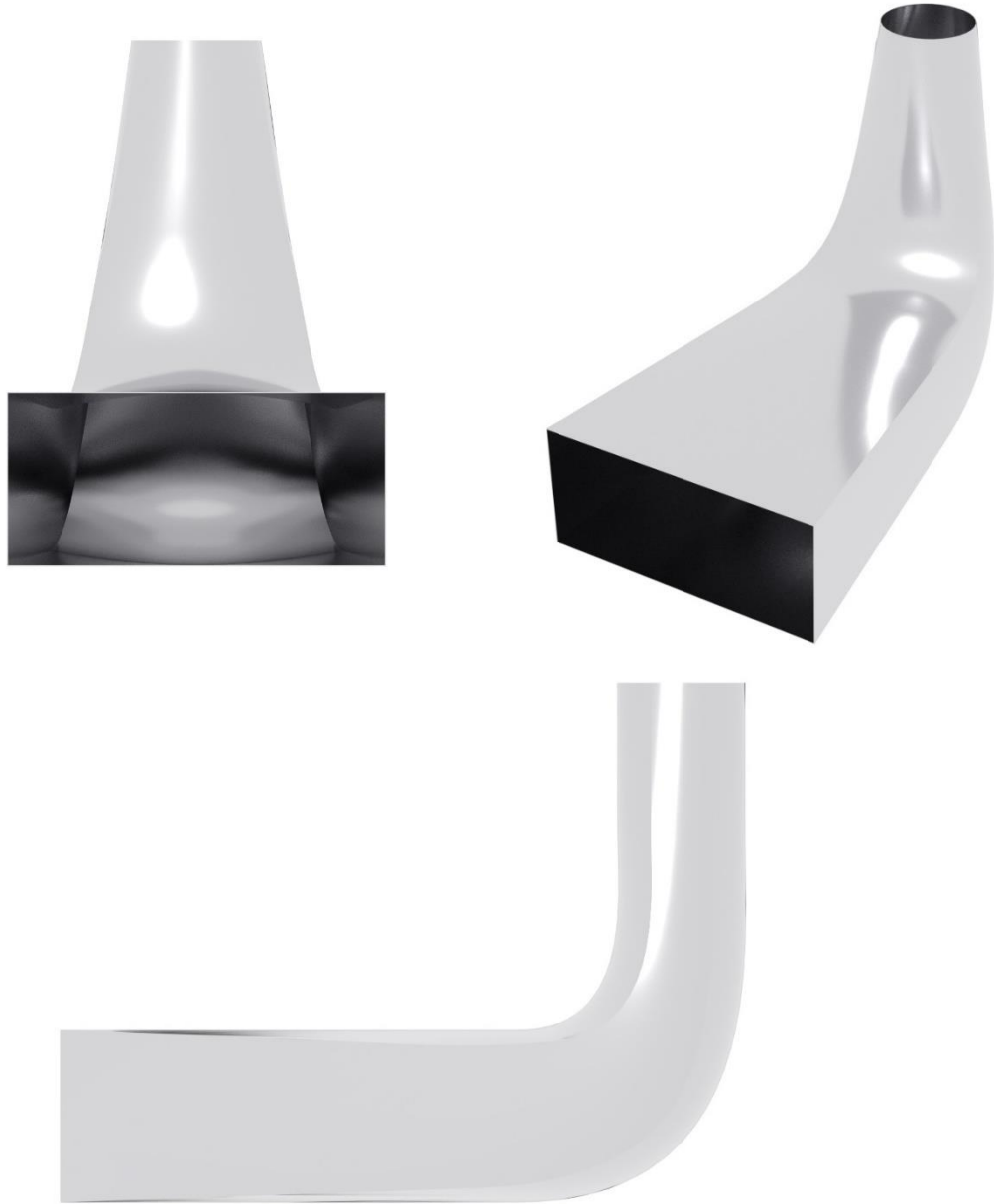
Vista frontal, perspectiva, trasera y perfil de la carcasa



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Modelado 3D del tubo de aspiración.**

Vista frontal, perfil y perspectiva del tubo de aspiración



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Manual de monitoreo.**

Manual de monitoreo y evaluación (VOSO)

El siguiente manual de monitoreo y evaluación, tiene como objetivo orientar al personal operador a realizar tareas de monitoreo y evaluación utilizando las técnicas VOSO (ver, oler, sentir y oír) para detectar posibles fallas en las turbinas Francis. Las técnicas VOSO se aplicaran en tres áreas de análisis: térmica, tribológica y de vibraciones.

**Análisis de temperaturas**

Técnica a aplicar: Oler 📢

El uso del sentido del olfato para un análisis de temperaturas se limita a buscar haciendo uso de este, olores fuera de lo normal como lo pueden ser:

Olor a quemado: incremento en la temperatura de la chumacera y posible quema de lubricante.

Olor a lubricante: posible fuga de lubricante.

**Análisis de temperaturas**

Técnica a aplicar: Sentir 🌡️

Para evitar lesiones o accidentes se evitara tener contacto con las turbinas cuando estén en operación, por lo que la técnica de sentir para un análisis de temperaturas se limita únicamente a percibir si existe un incremento en la temperatura ambiente al pararse cerca de los elementos que conforman las turbinas.



## Continuación apéndice 6.



### Análisis de temperaturas

Técnica a aplicar: Oír 

La interpretación de un análisis de temperaturas utilizando el oído resulta un tanto difícil de analizar, pero se pueden interpretar de la siguiente manera, si dentro de las turbinas se escuchan fuertes golpeteos o ruidos puede ser un indicio de cavitación la cual se debe a la aparición de burbujas de vapor dentro de la turbina en la cual existe un incremento de la temperatura y genera graves daños.



### Análisis de lubricantes



El análisis de lubricantes se enfoca a utilizar los sentidos humanos para distinguir variables físico-químicas de los lubricantes, por ejemplo presencia de espuma, color del lubricante, olor y viscosidad. Esto con el objetivo de proteger las turbinas y asegurar un buen uso del lubricante, el monitoreo de lubricantes ayuda a encontrar problemas potenciales.




### Análisis de lubricantes

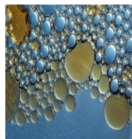
Técnica a aplicar: Ver 

El análisis de lubricantes se centra en evaluar las características físicas del lubricante pero siempre es necesario verificar que exista una correcta lubricación por lo que se deben tomar en cuenta las siguientes dos tareas:

1. Verificar los niveles de lubricante para las chumaceras y regulador de velocidades.
2. Verificar que los acelereros de los estoperos estén abiertos y calibrados a 10 gotas por minuto.

En cuanto a la observación del lubricante se tomaran en cuenta dos factores el color del lubricante y la presencia de espuma en él.

1. Verificar el color del lubricante, un cambio en el color del lubricante puede significar oxidación y contaminación de este. Si el lubricante se pone oscuro puede ser un indicio de un aumento de temperatura el cual puede ser dañino para las turbinas.
2. Verificar si existe presencia de espuma, la presencia de espuma en el lubricante indica contaminación por aire, el lubricante pierde su eficacia y puede generar sobrecalentamientos.
3. Un factor mas a tomar en cuenta son las emulsiones, estas se forman por la mezcla de lubricante y agua, el agua al igual que el aire contaminan los lubricantes haciéndolos perder su eficacia, las emulsiones pueden ocasionar herrumbre la cual es abrasiva y puede desgastar las chumaceras y válvulas.




### Análisis de lubricantes

Técnica a aplicar: Oler 

El olor de un lubricante ayuda a determinar dos estados, si el lubricante esta usado o si presenta oxidación. Por lo general el olor de un lubricante usado presenta un olor a grasa en cambio un lubricante con grado de oxidación o contaminación presenta un olor a quemado. Esta tarea se lleva a cabo abriendo el compartimiento de las chumaceras para tener acceso al lubricante.



## Continuación apéndice 6.



### Análisis de lubricantes

Técnica a aplicar: Sentir 

Una manera de hacer un análisis de lubricante utilizando el sentido del tacto es verificar la viscosidad de este. Para conocer la viscosidad del lubricante es necesario ponerse en contacto con este siempre tomando en cuenta las medidas de seguridad necesarias ya que este puede estar a una temperatura elevado. El objetivo es verificar la viscosidad del lubricante ya sea tocándolo o por medio de una vara para verificar que el lubricante no sea tan líquido. Si el lubricante se encuentra muy líquido quiere decir que ha perdido viscosidad por lo que no esta creando una película de lubricante entre las piezas y se puede generar sobrecalentamiento, desgastes y pérdidas de potencia.



### Análisis de lubricantes

Técnica a aplicar: Oír 

Utilizar el oído para un análisis de lubricantes no es posible, pero al realizar las tareas de inspección descritas anteriormente cabe destacar que es necesario siempre prestar atención a los ruidos que se pueden generar dentro de las turbinas. Si en dado caso se logra escuchar fricción o ruidos extraños en las chumaceras podría existir un contacto entre las piezas, la cual puede ser producida por una mala lubricación. Siempre es necesario notificar al ingeniero a cargo.



### Análisis de vibraciones



El análisis de vibraciones tiene como finalidad utilizar los sentidos humanos para detectar vibraciones en las turbinas, siendo esto parte de un mantenimiento predictivo, ayudando a evidenciar posibles fallas potenciales. La presencia de vibraciones en las turbinas puede provocar defectos internos como: desalineación, desbalance, desgaste de piezas, sobrecargas incluso defectos en el eje.












### Análisis de vibraciones

Técnica a aplicar: Ver 

Las vibraciones resultan un poco difícil de medir o cuantificar sin la instrumentación necesaria, para llevar a cabo el análisis de vibración utilizando la vista es necesario prestar mucho atención a la turbina. Para determinar la presencia de vibraciones es necesario verificar si la turbina o sus componentes tienen movimientos fuera de lo normal.



## Continuación apéndice 6.

 <h3>Análisis de vibraciones</h3> <p>Técnica a aplicar: Oír </p> <p>Las vibraciones se caracterizan por los ruidos que generan, por lo que la forma más fácil de detectar vibraciones es por la cantidad de ruido que se produce, si se siente bastante ruido fuera de lo normal es posible que se estén generando fuertes vibraciones que van a ocasionar graves daños a las turbinas. Una vez detectado es necesario reducir la carga a las turbinas, ya que las vibraciones se generan por desbalance en el rodete y este a someterse a caudales altos empieza a generar vibraciones.</p>  	<h3>Ruta de Monitoreo</h3>  
 <h3>Análisis de vibraciones</h3> <p>Técnica a aplicar: Oler </p> <p>No es posible oler las vibraciones pero siempre es necesario prestar atención a los olores que hay en la casa de máquinas, si se detecta uno fuera de lo normal se debe notificar al ingeniero a cargo para una inspección más a detalle.</p>  	 <h3>Análisis de vibraciones</h3> <p>Técnica a aplicar: Sentir </p> <p>Una forma fácil de detectar vibraciones es teniendo contacto directo con las turbinas, siempre tomando las debidas precauciones ya que algunas partes pueden estar a temperaturas elevadas. Se deben determinar los puntos en los cuales no hay riesgo de tocar la turbina, una vez identificados es posible verificar la presencia de vibraciones tocando la turbina. De existir vibraciones es necesario notificarlo ya que estas causan serios daños a la turbina y sus partes.</p>  

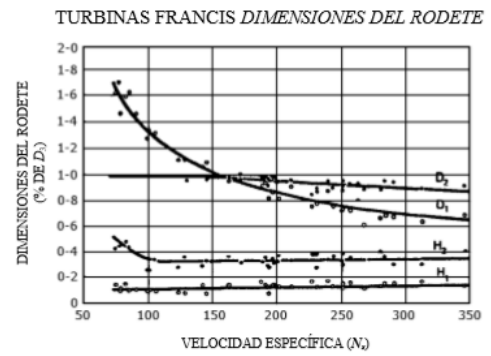
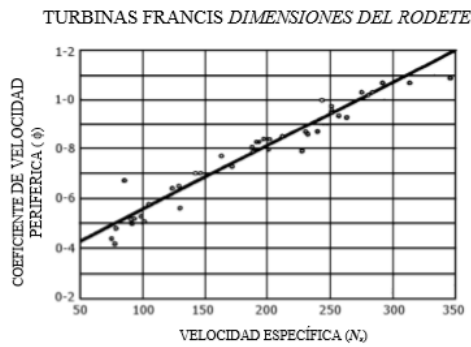
Fuente: elaboración propia.



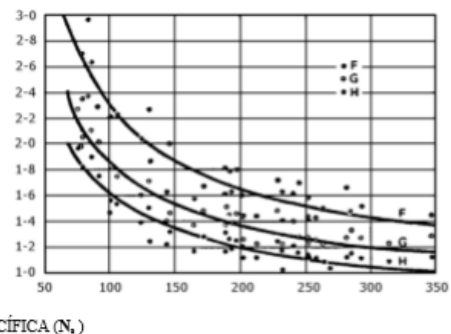
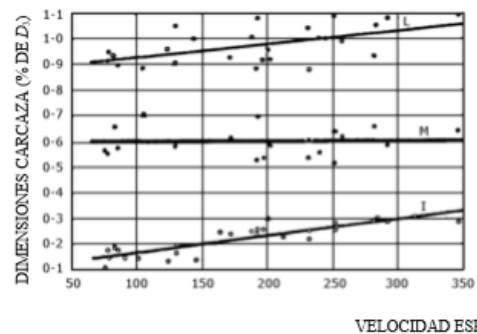
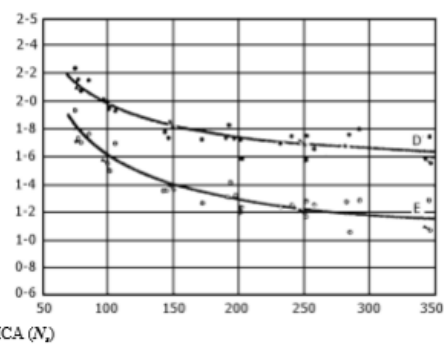
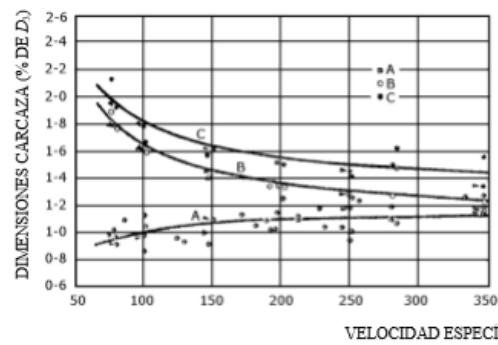
# ANEXO

## Anexo 1. Graficas para el dimensionamiento de una turbinas Francis.

### Dimensionamiento del rodete:

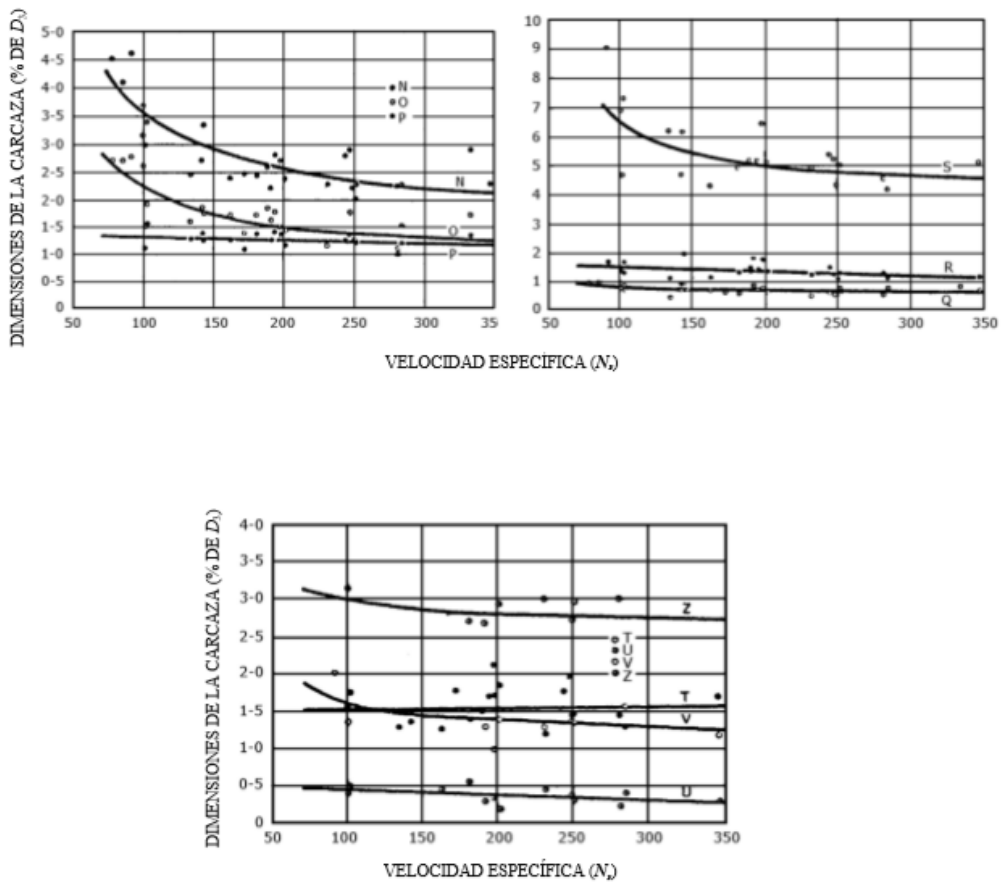


### Dimensionamiento de la carcasa:



Continuación anexo 1.

Dimensionamiento del tubo de aspiración:



Fuente: NAVA, Arturo. *Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas*. p. 36.