



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Artes en Energía y Ambiente

**ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA EN LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MOPA POR MEDICIÓN
DE CAUDAL CON MÉTODO ULTRASÓNICO PARA MAXIMIZAR LA PRODUCCIÓN
ENERGÉTICA, QUETZALTENANGO, GUATEMALA**

Ing. Daniel Eliseo Navarro Rivera

Asesorado por el M.A. Ing. Rudy Antonio García Valdez

Guatemala, abril de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA EN LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MOPA POR MEDICIÓN
DE CAUDAL CON MÉTODO ULTRASONÍCO PARA MAXIMIZAR LA PRODUCCIÓN
ENERGÉTICA, QUETZALTENANGO, GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. DANIEL ELISEO NAVARRO RIVERA

ASESORADO POR EL M.A. ING. RUDY ANTONIO GARCÍA VALDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ARTES EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, ABRIL DE 2023

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. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Mtro. Ing. César Augusto Castillo Morales
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:

**ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA EN LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MOPA POR MEDICIÓN
DE CAUDAL CON MÉTODO ULTRASÓNICO PARA MAXIMIZAR LA PRODUCCIÓN
ENERGÉTICA, QUETZALTENANGO, GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 12 de enero de 2022.

.

.

.



Ing. Daniel Eliseo Navarro Rivera

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 Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA EN LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MOPA POR MEDICIÓN DE CAUDAL CON MÉTODO ULTRASONICO PARA MAXIMIZAR LA PRODUCCIÓN ENERGÉTICA, QUITZALTENANGO, GUATEMALA**, presentado por: **Ing. Daniel Eliseo Navarro Rivera**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Energía y ambiente después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, abril de 2023

AACE/gaoc



Guatemala, abril de 2023

LNG.EEP.OI.356.2023

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

**“ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA EN LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA
MOPA POR MEDICIÓN DE CAUDAL CON MÉTODO ULTRASÓNICO
PARA MAXIMIZAR LA PRODUCCIÓN ENERGÉTICA,
QUETZALTENANGO, GUATEMALA”**

presentado por **Ing. Daniel Eliseo Navarro Rivera**
correspondiente al programa de ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Guatemala, 7 de noviembre de 2022

M.A. Ing. Edgar Dario Alvarez Coti
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

Estimado M.A. Ing. Alvarez Coti

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL y ARTÍCULO CIENTÍFICO** titulado: **ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA EN LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MOPA POR MEDICIÓN DE CAUDAL CON MÉTODO ULTRASÓNICO PARA MAXIMIZAR LA PRODUCCIÓN ENERGÉTICA, QUETZALTENANGO, GUATEMALA.** del estudiante **Daniel Eliseo Navarro Rivera** quien se identifica con número de carné **200212420** del programa de Maestria En Energía Y Ambiente

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el **Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014.** Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.



Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador
Maestria En Energía Y Ambiente
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, 7 de noviembre de 2022

M.A. Ing. Edgar Dario Alvarez Coti
Director
Escuela de Estudios de Postgrados
Presente

Estimado M.A. Ing. Alvarez Coti

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el Trabajo de Graduación y el Artículo Científico: **"ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA EN LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MOPA POR MEDICIÓN DE CAUDAL CON MÉTODO ULTRASÓNICO PARA MAXIMIZAR LA PRODUCCIÓN ENERGÉTICA, QUETZALTENANGO, GUATEMALA."** del estudiante **Daniel Eliseo Navarro Rivera** del programa de **Maestría En Energía Y Ambiente** identificado(a) con número de carné 200212420.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.



Rudy Antonio García Valdez
Ingeniero Electricista
Col. 14,801

Mtro. Ing. Rudy Antonio García Valdez
Colegiado No. 14801
Asesor de Tesis

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darme la vida y permitirme alcanzar una más de mis metas.
Mis padres	Benedicto Navarro y Rosa Rivera, por su apoyo, amor, dedicación, paciencia y esfuerzo, mi eterno agradecimiento por todas sus enseñanzas a lo largo de mi vida.
Mi esposa	Wendy Arrecis, por todo su amor y apoyo incondicional.
Mis hijas	Sofia y Elisa Navarro por ser mi luz, alegría, motivación y mi angelito.
Mis hermanos	Mefi-Boset y Rosa Navarro, por su apoyo y consejos incondicionalmente en esta etapa de mi vida.
Mi familia	Abuelos (q. d. e. p.), tíos, tías, y primos por el apoyo brindado a lo largo de todo este tiempo.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser el <i>alma mater</i> que me permitió formarme como profesional.
Facultad de Ingeniería	Por permitirme adquirir en sus aulas los conocimientos que me han formado a lo largo de mi carrera.
Hidroeléctrica Mopa	Por haberme permitido utilizar sus instalaciones y brindado la información necesaria para realizar esta investigación.
Mis amigos	Por su apoyo y compañerismo durante la carrera.
Mi asesor	M.A. Ing. Rudy Antonio García Valdez, por su apoyo durante la realización del trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. INFORMACIÓN GENERAL.....	1
1.1. Aspectos generales	1
1.2. Ubicación área/departamento/municipio o zona de estudio	2
1.3. Localización del área de estudio	4
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Fuentes de energía	7
2.1.1. Energía fósil.....	8
2.1.2. Energía hidráulica	8
2.1.3. Biomasa.....	8
2.1.4. Energía fotovoltaica	9
2.1.5. Energía eólica.....	9
2.1.6. Energía geotérmica	10
2.1.7. Energía mareomotriz	10
2.2. Centrales hidroeléctricas	11
2.2.1. Clasificación de las hidroeléctricas	11

2.2.2.	Componentes de una central hidroeléctrica	11
2.2.3.	Equipo de una central hidroeléctrica	13
2.3.	Métodos de medición de caudal en hidroeléctricas	13
2.3.1.	Método área – velocidad con molinete	14
2.3.2.	Método del índice de velocidad	18
2.3.3.	Método presión-tiempo	19
2.3.4.	Método ultrasónico	21
2.3.5.	Método electromagnético	23
2.4.	Pruebas de eficiencia aplicados a centrales hidroeléctricas	24
3.	ESTUDIO TÉCNICO	27
3.1.	Obras hidráulicas de la central	27
3.1.1.	Presa	27
3.1.2.	Canal	28
3.1.3.	Cámara de carga	29
3.1.4.	Tubería de presión	30
3.1.5.	Canal de desfogue	31
3.2.	Equipos mecánicos	31
3.2.1.	Válvula de entrada	31
3.2.2.	Turbina	32
3.2.3.	Caja multiplicadora	34
3.2.4.	Acoples Flender	35
3.3.	Equipos eléctricos	35
3.3.1.	Generador	35
3.3.2.	Armario control	37
3.3.3.	Transformador de potencia	38
3.4.	Sistema de control	40
3.5.	Análisis de variables que influyen en la eficiencia de la central hidroeléctrica Mopa	41

3.5.1.	Salto neto.....	42
3.5.2.	Caudal instantáneo.....	43
3.5.3.	Potencia Instantánea	43
3.5.4.	Eficiencia del transformador	43
3.5.5.	Eficiencia del generador	44
3.5.6.	Eficiencia de la turbina.....	44
4.	PROPUESTA DE SOLUCIÓN.....	45
4.1.	Medición caudal.....	45
4.2.	Cálculo del salto neto	47
4.2.1.	Pérdidas de carga en la rejilla de toma.....	48
4.2.2.	Pérdidas de carga en embocadura de tubería	49
4.2.3.	Pérdidas de carga en los codos.....	50
4.2.4.	Pérdidas de carga en disminución de la tubería	50
4.2.5.	Pérdidas de carga en cono de válvula.....	51
4.2.6.	Pérdidas de carga en la válvula.....	52
4.2.7.	Salto neto.....	53
4.3.	Medición de potencia generada.....	55
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	59
	CONCLUSIONES	63
	RECOMENDACIONES	65
	REFERENCIAS	67

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ubicación de área en estudio.....	2
2.	Área de captación de obra de toma en río Mopa	3
3.	Ubicación de área de captación en cuenca río Ocosito	4
4.	Localización de área en estudio.....	5
5.	Canal sección trapezoidal y rectangular.....	28
6.	Cámara de carga	29
7.	Tubería de presión	30
8.	Válvula	32
9.	Turbina <i>crossflow</i> de dos cámaras.....	33
10.	Caja multiplicadora y sistema de refrigeración.....	34
11.	Generador síncrono	36
12.	Armario de control	37
13.	Transformador seco	38
14.	Configuración transductores conexión Z.....	47
15.	Plano cotas de salto neto	55
16.	Medidor de energía Sentron PAC3200	56
17.	Medición de Scada de central Mopa	57
18.	Curva de rendimiento de turbina	62

TABLAS

I.	Características de devanados.....	39
II.	Características de medidor de flujo ultrasónico.....	45

III.	Pérdidas de carga totales en tubería	53
IV.	Caudales turbinados medidos	59
V.	Eficiencia de grupo turbina generador calculados	60
VI.	Pérdida de eficiencia de grupo turbina-generador mopa	61

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H	Altura
E	Este
°	Grados
°C	Grados Celsius
Hz	Hertzios
h	Hora
=	Igual que
kHz	Kilohercio
Km	Kilómetro
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt hora
kV	Kilovoltio
>	Mayor que
MW	Megawatt
MWh	Mega watt hora
<	Menor que
m	Metro
m ³	Metro cúbico
m ³ /s	Metro cúbico por segundo
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
mm	Milímetro
'	Pies o minutos
,	Pies o minutos

%	Porcentaje
P	Potencia
“	Pulgadas o segundos
Q	Quetzales
RPM	Revoluciones por minuto
Ns	Velocidad angular o velocidad específica
V	Voltaje
W	Watt

GLOSARIO

Caída bruta	Altura neta medida entre cámara de carga y casa de máquinas.
Casa de máquinas	Infraestructura en donde se encuentra la o las turbinas y los equipos de generación de una central hidroeléctrica.
Caudal	Cantidad de agua que lleva una corriente la cual pasa por un instante de tiempo procedente de una o varias fuentes.
Caudal de diseño	Caudal máximo con el cual se dimensionan todos los equipos de una central hidroeléctrica para una operación óptima.
Caudal instantáneo	Cantidad de agua que circula en un tiempo estipulado.
Caudal turbinado	Cantidad de agua que es utilizada para mover la turbina hidroeléctrica en un instante.
Caudalímetro	Instrumento de medida utilizado para medir el caudal o gasto volumétrico de un fluido.
Central hidroeléctrica	Conjunto de instalaciones industriales utilizadas para la generación de energía por medio de agua.

Cota	Número que indica la altura de un punto sobre el nivel de una referencia.
Curva de caudales	Gráfico en el cual se representan los posibles caudales a lo largo de un período de tiempo y representa de forma directa el rango de variación de caudal en un punto específico de una corriente.
Desfogue	Cota más baja de un complejo hidroeléctrico, punto en donde se regresa el agua al cauce natural del río donde fue tomado.
Eficiencia	Capacidad de los equipos eléctricos y mecánicos en la optimización del recurso para la generación de energía.
Embalse	Depósito natural o artificial para almacenar agua y posteriormente transportarla hacia una central eléctrica para la producción de energía.
Energía cinética	Energía que un objeto posee debido a su movimiento.
Energía potencial	Energía que contiene el agua debido a la altura y es aprovechable para generar electricidad a partir de la misma.
Equipos de generación	Conjunto de máquinas utilizadas en una central para la generación de energía eléctrica.

Flotador	Utensilio de material insumergible que se mantiene a flote utilizado para la cuantificación de caudales en ríos o canales.
Generador	Máquina eléctrica utilizada para generar una diferencia de potencia en sus bornes para generar electricidad utilizando potencia mecánica.
Medidor ultrasónico	Medidor que utiliza ultrasonido para realizar la medición del caudal.
PLC	Controlador lógico programable, es un ordenador industrial que se utiliza para la automatización de procesos y manejo de equipos.
Potencia entrada	Potencia que ingresa a un circuito o proceso.
Potencia salida	Potencia que regresa de un circuito o proceso después de sufrir una transformación.
Presa	Obstáculo que tiene como objetivo elevar el nivel del agua a una cota específica o el desvío de esta para el manejo y aprovechamiento en la generación de energía eléctrica.
Recurso hídrico	Es el recurso natural que consiste en cuerpos de agua e independientemente de su calidad puede aprovecharse para distintos usos.

Rodete	Elemento rotativo dentro de una turbina hidráulica, es un rotor situado dentro de un conducto y el centro de masa donde gira la turbina.
SCADA	Sistema de adquisición de datos es una herramienta de automatización y control industrial utilizada en el proceso de generación eléctrica que puede controlar y supervisar los procesos productivos.
Sensores de medición	Equipo electrónico que obtiene datos de variables medibles de forma análoga o digital para la cuantificación de parámetros.
Tensión	Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, medida en Voltios.
Transformador	Dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico.
Turbina hidráulica	Aprovecha la energía de un fluido y la convierte en energía mecánica rotativa para su aprovechamiento en la generación de energía.
UTM	Sistema de coordenadas universal transversal de Mercator.
Vatio	Unidad de medida de potencia.

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo principal, realizar el análisis de la eficiencia de la central hidroeléctrica Mopa a través de la medición del caudal turbinado instantáneo, y con ello obtener la eficiencia de la central en toda la curva de caudales turbinados, los cuales incluyen desde el 10 % al 100 % del caudal del diseño de la hidroeléctrica.

El problema por resolver es efectuar el análisis de la central hidroeléctrica Mopa por medición de caudal a través del método ultrasónico para esto se utilizarán sensores no intrusivos ultrasónicos para la medición de caudal, de manera que no sea una medición interna para los equipos y no existan pérdidas en la producción de energía por la realización de la medición, ni por la instalación de los equipos de medición y lograr como resultado, la optimización de la producción.

La información por utilizar son datos de medición de caudal, potencia, voltaje y corriente. Posterior a identificar las variables a analizar, serán ingresados los datos a una hoja de cálculo donde se ordenarán los datos y se presentará en tablas y gráficos para establecer la eficiencia de los equipos en cada caudal turbinado instantáneo, los cuales se confrontarán con la gráfica de eficiencia del fabricante de los equipos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, uno de los recursos energéticos más explotados para la generación de electricidad es la energía hidroeléctrica, por lo que se hace de vital importancia la adecuada explotación de esta, existiendo una mayor importancia de tener en óptimas condiciones los equipos para su generación.

Para la medición de la eficiencia de las centrales hidroeléctricas se requieren de estudios de eficiencia en los cuales es necesaria la intervención de los equipos y componentes de la central, lo cual conlleva a realizar instalaciones y detener la producción para realizar los análisis de eficiencia a cada equipo.

Para las pequeñas centrales hidroeléctricas el costo de los estudios de análisis de eficiencia y los tiempos que se debe detener la planta para realizar los mismos son de un alto costo, por lo que no se acostumbra a realizar porque son pérdida para la producción anual de la planta.

Otro de los factores negativos para poder realizar un análisis de eficiencia de la central hidroeléctrica, es que se hace necesaria la instalación de equipos de tipo intrusivo, lo cual afecta la operación normal de la hidroeléctrica, ya que al instalarlos hay que hacer modificaciones a las instalaciones para poder realizar el análisis.

De esta cuenta es común entonces que no se realicen los análisis de eficiencia de las pequeñas centrales hidroeléctricas porque se incurren en ciertas pérdidas económicas por la realización de estos.

Por lo anterior, el presente estudio dará una alternativa para la medición de la eficiencia de los equipos de pequeñas centrales hidroeléctricas con la utilización de sensores de ultrasonido para la medición de caudal en tiempo real y con la medición de la energía instantánea generada, poder calcular la eficiencia del grupo turbina-generator y poder analizar la eficiencia de los equipos en toda la curva de caudales posibles de turbinar. Al terminar el análisis, se procederá a comparar con los análisis de fábrica de los equipos a modo de comparativa.

La pregunta principal de la investigación es ¿Cómo se puede maximizar la eficiencia en la central hidroeléctrica Mopa para lograr un aumento en la producción de energía?

Las preguntas complementarias de la investigación planteada se muestran a continuación:

- ¿Cuáles son los parámetros que influyen en la eficiencia de la central hidroeléctrica Mopa?
- ¿Cuáles son los beneficios de la utilización de un medidor de caudal ultrasónico en la central hidroeléctrica Mopa?
- ¿Cuál es la eficiencia de la central hidroeléctrica Mopa, Quetzaltenango, Guatemala?

OBJETIVOS

General

Evaluar la eficiencia de la producción eléctrica por medición de caudal con método ultrasónico, a fin de maximizar la generación de energía en la central hidroeléctrica Mopa, Quetzaltenango, Guatemala.

Específicos

1. Realizar el registro de la producción energética de la hidroeléctrica Mopa, a fin de compararlas con las resultantes al utilizar el medidor de caudal ultrasónico.
2. Analizar cuáles son los parámetros que influyen en la eficiencia de la central hidroeléctrica Mopa, con y sin la utilización del medidor de caudal ultrasónico.
3. Identificar cuáles son los beneficios de la utilización de un medidor de caudal en la producción de energía eléctrica.
4. Determinar cómo mejorar la eficiencia energética con un medidor de caudal ultrasónico.

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

La presente investigación es de tipo cuantitativa descriptiva, el objetivo de esta investigación será analizar la eficiencia de los equipos de la central hidroeléctrica Mopa y para ello usar un medidor de caudal ultrasónico para la medición del caudal turbinado, por lo que se varía el caudal para medir la eficiencia, por lo tanto, se define como un diseño experimental.

El enfoque es de carácter cuantitativo, la información a utilizar son datos de medición de caudal, potencia, voltaje y corriente; así también se considera la potencia de entrada, datos obtenidos del SCADA de operación de los equipos de generación y sensores de medición.

Las variables por estudiar durante el proceso de esta investigación son: caudal (independiente) y potencia de salida (dependiente). Se utiliza como universo del 10 % al 100 % del caudal de diseño que representan todos los valores que son posibles utilizar para generar energía eléctrica de manera segura con los equipos de la central hidroeléctrica Mopa, se excluyen los valores por debajo del 10 % debido a que no puede funcionar la turbina con seguridad en ese rango.

La técnica de recolección de datos por utilizar es la observación ordinaria, al realizar la toma correcta de datos obtenidos a través del trabajo de campo, la recopilación de datos de medición de los sensores de caudal y medidores de potencia los cuales influyen en la eficiencia de los equipos y comparación con la curva de eficiencia de fábrica de los mismo para la evaluación del rendimiento.

Para medir el caudal, se utilizará un medidor ultrasónico modelo Dynasonic Hybrid Ultrasonic Flow meters para obtener y guardar los datos instantáneos de los sensores de caudal en la tubería y poder así, obtener datos instantáneos del consumo de agua de la central hidroeléctrica. Al mismo tiempo se utilizarán voltímetro, amperímetro y medidor de energía en cada los bornes del generador para calcular la potencia generada instantáneamente con cada caudal instantáneo.

Luego de identificar las variables a analizar, con la obtención de los datos cuantificables, serán ingresados los datos a una hoja de cálculo en Microsoft Excel y así presentar los datos y resultados en tablas y gráficas para establecer la eficiencia de los equipos en cada caudal turbinado. Al contar con las tablas y gráficas, se analizará la curva de eficiencia para comparar los resultados obtenidos con la gráfica de eficiencia del fabricante de los equipos.

INTRODUCCIÓN

Históricamente la hidroeléctrica es uno de los medios más antiguos de generación de energía eléctrica y actualmente es uno de los recursos más utilizados, debido a que esta tecnología es catalogada como limpia y renovable. Una central hidroeléctrica es aquella que genera energía a partir de la cinética del agua, la cual convierte a componente mecánico para su posterior conversión a energía eléctrica, por medio de una turbina y un generador eléctrico.

Para poder evaluar la eficiencia de un grupo turbina – generador, es necesario evaluar los parámetros que influyen en el proceso de generación de energía, entre los cuales están el salto neto y caudal turbinado, este último es el más costoso de monitorear debido a las dificultades técnicas para medirlo.

En la actualidad existe el método ultrasónico para medición de caudal en tuberías el cual es no intrusivo y utiliza la señal de dos transductores ultrasónicos que envían señal entre sí para poder medir la velocidad del agua y poder así calcular el volumen y caudal instantáneo.

Al obtener el caudal instantáneo y la potencia de salida del generador podemos calcular la eficiencia instantánea de los equipos de generación, y obtener así la curva de eficiencia en toda la curva de caudales turbinados.

En el primer capítulo se dará la información general del estudio, en el segundo capítulo se describe una base teórica a la investigación para luego proceder al estudio técnico como capítulo tercero donde se indicarán todos los aspectos técnicos a tomar en cuenta en el estudio.

En el capítulo cuarto se detalla la propuesta de solución al problema de investigación dando así en el capítulo cinco, el análisis de los resultados obtenidos después de la realización del estudio.

1. INFORMACIÓN GENERAL

Uno de los recursos energéticos más explotados para la generación de energía eléctrica es la generada por efecto del agua, por lo que se hace de vital importancia, la adecuada recolección, la explotación y la generación. Ésta última requiere de tener en óptimas condiciones los equipos para la producción de electricidad.

La hidroeléctrica en la cual se llevará a cabo el análisis de eficiencia es la central Mopa, tiene una potencia instalada de 1 MW y genera energía a filo de agua bajo la modalidad de la Norma Técnica de Generador Distribuido Renovable.

1.1. Aspectos generales

Para las pequeñas centrales hidroeléctricas, el costo de los estudios de análisis de eficiencia y los tiempos que se debe detener la planta para realizar los mismos son elevados, por lo que no se acostumbra a realizar porque se considera como pérdida para la producción anual de la planta.

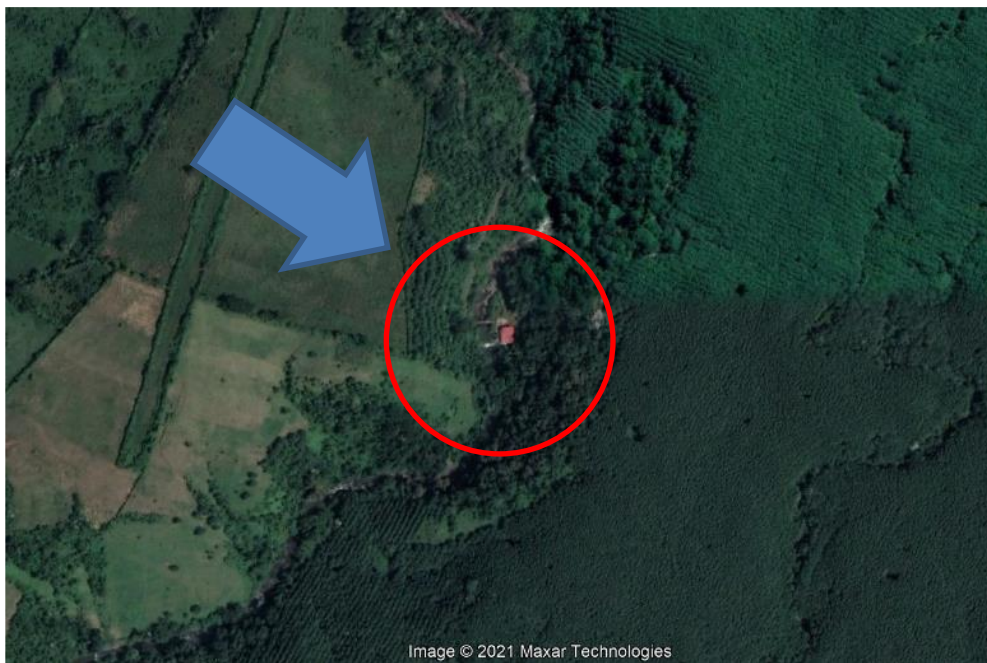
La eficiencia de los equipos se basa en el diseño de la central, que debe ser adecuado en cuanto a la caída bruta, caudal de diseño y tipo de turbina a utilizar, y de la interrelación entre estos, depende el buen funcionamiento y aprovechamiento del recurso energético.

Para la medición de la eficiencia de las centrales hidroeléctricas se requieren de estudios donde es necesaria la intervención de los equipos y componentes de la central, lo cual conlleva a realizar instalaciones y detener la producción para realizar los análisis de eficiencia a cada uno.

1.2. Ubicación área/departamento/municipio o zona de estudio

La central hidroeléctrica en la cual se llevará a cabo el análisis se encuentra ubicada en la aldea Santa Marta, municipio de Flores Costa Cuca, departamento de Quetzaltenango. Se encuentra a una altitud de 232 metros sobre el nivel del mar, coordenadas latitud $14^{\circ}37'35''$ norte y una longitud de $90^{\circ}52'31''$ oeste.

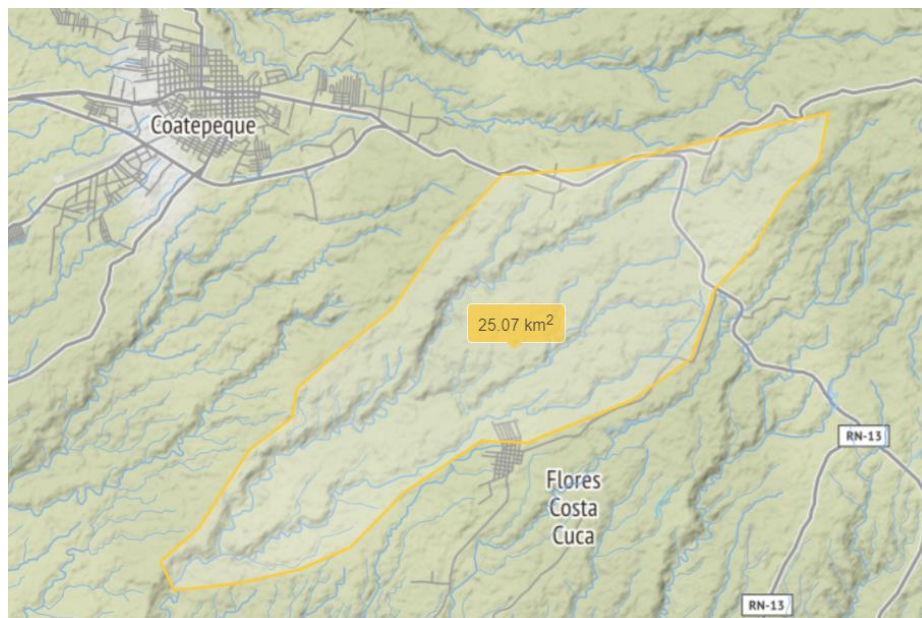
Figura 1. Ubicación de área en estudio



Fuente: Google Earth Pro (2021). Consultado el 19 de octubre de 2021. Recuperado de CNES/Airbus 2021 Maxar Technologies.

La toma de agua de la central hidroeléctrica capta el río Mopa, el cual nace en la comunidad de Las Delicias en el municipio de Coatepeque departamento de Quetzaltenango y tiene un área de captación de 25.07 km².

Figura 2. **Área de captación de obra de toma en río Mopa**



Fuente: IDEG (2021). Consultado el 25 de septiembre de 2022. Recuperado de <https://ideg.segeplan.gob.gt/geoportal/>.

El río Mopa pertenece a la vertiente del Pacífico y se encuentra en la cuenca del río Ocosito.

Figura 3. **Ubicación de área de captación en cuenca río Ocosito**



Fuente: IDEG (2021). Consultado el 25 de septiembre de 2022. Recuperado de <https://ideg.segeplan.gob.gt/geoportal/>.

1.3. Localización del área de estudio

El área en estudio se encuentra ubicada en la aldea Santa Marta, municipio Flores Costa Cuca, departamento Quetzaltenango. Actualmente está comunicada por una carretera de terracería a través de la cual se puede acceder a la aldea desde su cabecera municipal de Flores Costa Cuca, Quetzaltenango a una distancia de 8 km o desde el municipio de Coatepeque, Quetzaltenango por carretera de terracería a una distancia de 10.2 km.

Figura 4. Localización de área en estudio



Fuente: Google Earth Pro (2021). Consultado el 19 de octubre de 2021. Recuperado de CNES/Airbus 2021 Maxar Technologies.

2. MARCO TEÓRICO

El índice de consumo mundial de energía comercial es miles de veces inferior a los flujos de energía que la Tierra recibe del Sol. La energía hidroeléctrica, que indirectamente proviene de la energía solar, comparte las ventajas de ser autóctona, limpia e inagotable como el resto de las energías renovables.

La producción anual media de la energía hidroeléctrica a nivel mundial es de 2,600 TWh, lo que representa aproximadamente el 19 % del total de la energía eléctrica producida. La potencia hidroeléctrica instalada en todo el mundo asciende a 700 GW.

“A gran escala esta fuente de energía tiene un campo de expansión limitado, ya que en los países más desarrollados la mayoría de los ríos importantes ya cuentan con una o varias centrales” (Pedroza, 2016, p. 20).

2.1. Fuentes de energía

Las distintas fuentes de energía que encontramos pueden ser clasificadas en dos grupos las cuales son renovables y no renovables. Estas se clasifican por el tipo de recurso, si es una fuente que es permanente e inagotable se dice que es renovable y si es temporal y agotable se le llama no renovable.

2.1.1. Energía fósil

Los combustibles fósiles se pueden utilizar en forma sólida (carbón), líquida (petróleo) o gaseosa (gas natural). Son acumulaciones de seres vivos que vivieron hace millones de años y que se han fosilizado formando carbón o hidrocarburos. En el caso del carbón se trata de bosques de zonas pantanosas, y en el caso del petróleo y el gas natural de grandes masas de plancton marino acumuladas en el fondo del mar.

En ambos casos la materia orgánica se descompuso parcialmente por falta de oxígeno y acción de la temperatura, la presión y determinadas bacterias de forma que quedaron almacenadas moléculas con enlaces de alta energía (Ecured, 2021).

2.1.2. Energía hidráulica

Uno de los recursos más importantes cuantitativamente en la estructura de las energías renovables es la procedente de las instalaciones hidroeléctricas; una fuente energética limpia y autóctona, pero para la que se necesita construir las necesarias infraestructuras que permitan aprovechar el potencial disponible con un coste nulo de combustible. El problema de este tipo de energía es que depende de las condiciones climatológicas (Ecured, 2021).

2.1.3. Biomasa

La formación de biomasa a partir de la energía solar se lleva a cabo por el proceso denominado fotosíntesis vegetal que a su vez es desencadenante de la cadena biológica. Mediante la fotosíntesis las plantas que contienen clorofila, transforman el dióxido de carbono y el agua de productos minerales sin valor

energético, en materiales orgánicos con alto contenido energético y a su vez sirven de alimento a otros seres vivos.

La biomasa mediante estos procesos almacena a corto plazo la energía solar en forma de carbono. La energía almacenada en el proceso fotosintético puede ser posteriormente transformada en energía térmica, eléctrica o carburantes de origen vegetal, liberando de nuevo el dióxido de carbono almacenado (Ecured, 2021).

2.1.4. Energía fotovoltaica

Las diferentes tecnologías fotovoltaicas se adaptan para sacar el máximo rendimiento posible de la energía que recibimos del sol. De esta forma por ejemplo los sistemas de concentración solar fotovoltaica (CPV por sus siglas en inglés) utiliza la radiación directa con receptores activos para maximizar la producción de energía y conseguir así un coste menor por kWh producido (Ecured, 2021).

2.1.5. Energía eólica

Un parque eólico es la instalación integrada de un conjunto de aerogeneradores interconectados eléctricamente. Los aerogeneradores son los elementos claves de la instalación de los parques eólicos que, básicamente, son una evolución de los tradicionales molinos de viento. Como tales son máquinas rotativas que suelen tener tres aspas, de unos 20-25 metros, unidas a un eje.

El elemento de captación o rotor que está unido a este eje capta la energía del viento. El movimiento de las aspas o paletas, accionadas por el viento, activa un generador eléctrico que convierte la energía mecánica de la rotación en energía eléctrica (Ecured, 2021).

2.1.6. Energía geotérmica

La energía geotérmica es aquella energía que puede ser obtenida por el ser humano mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra. Parte del calor interno de la Tierra (5.000 °C) llega a la corteza terrestre.

En algunas zonas del planeta, cerca de la superficie, las aguas subterráneas pueden alcanzar temperaturas de ebullición, y, por tanto, servir para accionar turbinas eléctricas o para calentar.

El calor del interior de la Tierra se debe a varios factores, entre los que destacan el gradiente geotérmico y el calor radiogénico. Geotérmico viene del griego *geo*, Tierra; y de *thermos*, calor; literalmente calor de la Tierra (Ecured, 2021).

2.1.7. Energía mareomotriz

El movimiento del agua en los océanos del mundo crea un vasto almacén de energía cinética o energía en movimiento. Esta energía se puede aprovechar para generar electricidad que alimenta las casas, el transporte y la industria (Ecured, 2021).

2.2. Centrales hidroeléctricas

Una central hidroeléctrica es una planta industrial la cual utiliza la energía cinética del agua para convertir por medio de turbinas hidráulicas dicha energía en movimiento cinético de un eje, el cual conectado a un generador produce la energía eléctrica.

2.2.1. Clasificación de las hidroeléctricas

Las hidroeléctricas se pueden clasificar de distintas maneras, por su obra de toma, potencia, tipo de turbina o uso de agua. Las más comunes y menos dañinas al ambiente son las de filo de agua. Estas sólo toman el agua para turbinar y la devuelven instantáneamente, no almacenan el agua.

Para evaluar una hidroeléctrica se toma en cuenta el caudal; tipo de turbina por nivel de caída; hidrología, topografía, estudio de suelos. Todos estos parámetros, permiten definir tanto el dimensionamiento geométrico como de producción de energía.

2.2.2. Componentes de una central hidroeléctrica

Según Beltrán *et. al.* (2018):

La toma de agua o captación es el conjunto de estructuras encargada de desviar parte del agua del cauce del río y su diseño debe estar enfocado en minimizar las pérdidas de carga. Generalmente la toma dispone de una reja que impide que objetos grandes como ramas de árboles, o desechos entren al canal.

El desarenador es la obra civil que permite realizar la separación de residuos sólidos y demás sedimentos presentes en el agua, los cuales se depositan en el fondo de la estructura gracias a la disminución de la velocidad del agua, este proceso permite mantener constante la sección en el sistema de conducción y evita desgaste prematuro de las turbinas.

La cámara de carga es otra obra civil que conecta el canal de conducción con la tubería forzada, ocasionalmente se utiliza como depósito final de regulación, aunque generalmente solo tiene capacidad de suministrar el volumen requerido para el arranque de la turbina. (p. 15)

Para Beltrán *et. al.* (2018):

La tubería de presión tiene como función transportar el agua desde la cámara de carga hasta la turbina, debe estar diseñada para soportar la presión que produce la masa de agua, así como la presión generada por un golpe de ariete en caso de un paro de emergencia de la central.

Los parámetros principales de selección del material de la tubería son los costos de mantenimiento, el espesor de pared, las pérdidas ocasionadas por la fricción y el tipo de anclaje. Para la ubicación de la tubería se deben identificar lugares geológicamente estables y que optimicen la trayectoria de ésta, se busca minimizar las pérdidas en la conducción del agua.

La casa de máquinas es una obra civil que tiene como principal función albergar y proteger los equipos electromecánicos y los elementos de regulación, control y protección de la central. (p. 15-16)

2.2.3. Equipo de una central hidroeléctrica

Para Castañeda (2016):

- Turbina: es la estructura mecánica encargada de convertir la energía hidráulica en mecánica que a la vez activa el generador. Existen diferentes tipos de turbinas según la dirección del caudal, la velocidad de la turbina o según la forma en que en que transforma la energía hidráulica en mecánica.
- Generador: es el equipo encargado de transformar la energía mecánica en eléctrica. Se forma a partir de dos elementos, un estator o inducido y un rotor o inductor que generan un campo electromagnético originando la corriente eléctrica, ya que el rotor al girar por acción del eje de la turbina rompe el campo electromagnético y produce una corriente de electrones.
- Elementos complementarios: subestación, barraje, reguladores, alarmas, protecciones, tableros de medida y sistemas de comunicación entre otros. (p. 21)

2.3. Métodos de medición de caudal en hidroeléctricas

Para Pedroza (2016):

Cuantificar la eficiencia real de un equipo hidráulico está en relación directa a cuantificar en forma más exacta el gasto turbinado, es así como, entre más exacta sea la medición del gasto turbinado más real será la

eficiencia obtenida, es por ello, que los requerimientos de medición son más altos que en la medición de gastos en obras hidroagrícolas.

La norma IEC-60041 establece que cuando se adquiere una turbina hidráulica, ésta debe contar con garantías de funcionamiento, cubriendo al menos la potencia, gasto turbinado, eficiencia, velocidad máxima de rotación instantánea, presión mínima/ máxima instantánea y embalamiento máximo en estado estacionario. Las pruebas de aceptación en máquinas hidráulicas tienen el propósito de comparar el funcionamiento hidráulico alcanzado por éstas y las garantías entregadas por el proveedor. Estas incluyen la evaluación de los valores absolutos de la energía hidráulica específica, gasto turbinado, potencia mecánica, velocidad de rotación y eficiencia.

En la literatura se aconseja que dado que la medición de caudales en centrales hidroeléctricas se puede ser llevar a cabo con la exactitud deseada solamente cuando los requisitos del método seleccionado se satisfagan, entonces las partes involucradas deben seleccionar el(los) método(s) a ser usado en las pruebas de aceptación de común acuerdo e incluso que debiera ser prevista antes, en la etapa de diseño de la planta, ya que en ocasiones proveerlo en las etapas posteriores o finales puede hacer que el sistema de medición sea muy caro o aún que no se pueda instalar. (p. 25-26)

2.3.1. Método área – velocidad con molinete

Para este tipo de aforo es fundamental establecer la sección transversal donde se va a realizar el aforo, la cual debe ser de fácil acceso. Igualmente, se debe seleccionar el tramo de la corriente con una longitud apreciable y de sección

constante, que permita considerar condiciones cercanas al flujo uniforme tanto longitudinal como transversalmente. Además, se deben evitar estructuras que obstaculicen el paso del flujo. La velocidad del caudal se determina a través de un molinete, conformado por una hélice que gira a la velocidad de la corriente, cuya ecuación general es:

$$Vm = an + b \quad (1)$$

Donde:

V_m : velocidad de la corriente (m/s)

n : número de revoluciones de la hélice (rad/s)

a : Constante de paso hidráulico, obtenida experimentalmente en ensayos de arrastre en (m)

b : constante que considera la inercia y velocidad mínima para que la hélice se mueva (m/s)

Para determinar el área de la sección transversal del río hay que medir el ancho de la sección, junto con las profundidades, cada metro, a lo largo de la misma, de modo que, como mínimo, por cada subdivisión pase el 10 % del caudal total; estas profundidades se miden con la ayuda de varillas o ecosondas. El caudal total que pasa por la sección transversal del río se obtiene como la suma de los caudales parciales de cada subdivisión. (Fernández y Duarte, 2012, p. 46)

Si se usa en un canal abierto, éste debe ser un canal artificial o una sección transversal bien definida. Las corrientes naturales no se consideran adecuadas para las pruebas que se llevan a cabo en plantas hidroeléctricas.

Las mediciones con cada arreglo de molinetes deben durar al menos 2 minutos. Si se presentan variaciones de velocidad entonces cada prueba debe incluir al menos cuatro ciclos de estas variaciones. Esto influye en la duración del programa completo de ensayos. La duración de las variaciones se puede determinar mediante observaciones del cambio en la velocidad de los molinetes de 10 -15 minutos, para al menos dos condiciones típicas de operación.

El número de secciones o verticales donde medimos la velocidad del agua debe ser suficiente para asegurar que el perfil de velocidades se determine satisfactoriamente sobre toda la sección de medición. No se permite que haya sólo un punto de medición. (Pedroza, 2016, p. 29)

Se tienen dos tipos principales de molinetes: el molinete de eje vertical o de copas, compuesto de un eje central y vertical alrededor del cual van unidos los rotores o copas; y el molinete de eje horizontal o hélice, compuesto de un eje central y horizontal alrededor del cual van unidos los alabes curvados o hélice. El más utilizado es el rotor de eje vertical, ello responde a que es el más utilizado en aforo de ríos. El rotor de eje vertical se compone de la rueda de copas, el pivote, el tornillo sin fin y la joya. (Pedroza, 2016, p. 37)

La rueda de copas es un arreglo de seis piezas cónicas huecas, que comúnmente se llaman copas, y que están unidas entre sí por una placa que tiene forma de estrella con un orificio central que tiene una pequeña muesca para acoplarse al tornillo sin fin. Se puede considerar a la rueda de copas como el elemento primario ya que las copas reciben el empuje de agua y giran por esta razón, el giro de la rueda de copas es proporcional a la velocidad del agua. (Pedroza, 2016, p. 41)

El pivote se trata de una varilla cilíndrica puntiaguda en un extremo y roscada en el otro acompañada de una tuerca, el cual se coloca en la horquilla en el cilindro inferior y cumple la importante función de servir como soporte y eje del giro de la rueda de copas. El tornillo sin fin su función es transmitir el giro de la rueda de copas a la cámara de contactos. (Pedroza, 2016, p. 42)

Solamente se usarán molinetes de propela. El impulso eléctrico de la rotación de la hélice debe ser transmitida por cables hacia el contador y el dispositivo de adquisición de datos, de tal manera que la velocidad de rotación instantánea pueda ser vista antes y después de la prueba. Los molinetes deben cumplir los requisitos de la norma ISO 2537 Hydrometry – Rotating element current-meters. Todos los molinetes deben ser capaces de resistir la presión del agua y el tiempo de sumergencia sin cambiar su calibración. Puede ser necesario reducir dicho tiempo donde el agua es dura. (Pedroza, 2016, p. 30)

La incertidumbre sistemática estimada a un nivel de 95 % de confianza, debida a la calibración del medidor, normalmente debe ser menor al 0.5 % para velocidades entre 0.4 m/s y 6 m/s. Para velocidades mayores o menores se espera una incertidumbre mayor a la señalada, dependiendo de las características de la estación de calibración y de las hélices. El tiempo de calibración depende de la duración y el tipo de pruebas a las que serán sometidos los medidores. Se puede tomar como guía 300 horas de uso en condiciones favorables. Solamente es necesario calibrar los medidores después de las pruebas si éstos presentan algún daño. (Pedroza, 2016, p. 31)

2.3.2. Método del índice de velocidad

El método del índice de velocidad puede ser efectivo para estimar el caudal en algunas condiciones cuando el método de la relación nivel - caudal no es efectivo, por ejemplo, en la presencia de remansos variables.

En el método del índice de velocidades, la velocidad del agua medida por un instrumento en una porción del río se utiliza como un índice de la velocidad media en el canal. La velocidad media estimada utilizando dicho método se combina con el área transversal para generar registros de caudal. Los instrumentos que generalmente se utilizan para medir la velocidad en el método del índice de velocidad incluyen los dispositivos de velocidad acústicos - AVMs (*acoustic velocity meters*), dispositivos de velocidad acústicos Doppler - SDVM (*acoustic Doppler velocity meters*) y los perfiladores acústicos Doppler - ADCP (*acoustic Doppler current profilers*). La velocidad medida por el instrumento y que se utiliza como parámetro independiente en el método del índice de velocidad se denomina el índice de velocidad.

El método consiste en la utilización de dos curvas de relación: nivel - área transversal, e índice de velocidad - velocidad media para calcular el caudal. Para realizar una medición de caudal se parte de la medición de nivel de agua para estimar el área efectiva utilizando una curva desarrollada para tal propósito, luego a partir del índice de velocidad y la curva de relación se estima la velocidad promedio, finalmente el caudal se estima como la multiplicación de esos dos parámetros.

Para González (2020):

La curva nivel - área transversal establece la relación entre esas dos variables y se debe obtener lo más cerca posible al sitio de medición del índice de velocidad. Se desarrolla con base a datos recolectados en una sección transversal dada, denominada sección transversal estándar. En lo posible, dicha sección transversal debe ser lo más estable posible. Se deben realizar revisiones periódicas de la sección transversal para comprobar cambios y ajustar la correspondiente curva de relación nivel - área transversal.

La curva índice de velocidad - velocidad media relaciona la velocidad medida en una sección del canal con la velocidad media en la sección transversal estándar correspondiente. Varias mediciones de caudal en el rango esperado se deben obtener para una adecuada obtención del índice de velocidad. (pp. 12-13)

2.3.3. Método presión-tiempo

Método para medir caudales, frecuentemente conocido como Método de Gibson el cual está basado en la segunda ley de Newton y en leyes de la mecánica de fluidos. Proporciona la relación entre la fuerza debida a la diferencia del cambio de presión entre dos secciones y la aceleración o desaceleración de la masa de agua entre esas secciones debido al movimiento de una compuerta o álabe. En teoría, este método es válido para turbinas y bombas cuando están en operación o para cuando se abre o se cierra una compuerta, en la práctica solamente se usa cuando en una turbina que está operando el caudal se interrumpe repentinamente.

En general este método se usa para determinar el gasto que estaba circulando dentro de un tramo de tubería a presión, justo antes de cerrar una compuerta aguas abajo. Es una práctica común que este método se lleve a cabo cuando se da mantenimiento a las unidades de presión.

La norma IEC 60041 describe tres variantes, sus requisitos del sistema de medición y cálculo. Se diferencian dependiendo de la instrumentación utilizada y las técnicas de integración, sin embargo, el principio sigue siendo el mismo.

Según Pedroza (2016):

- Variante 1. Método diferencial de presión-tiempo. El cambio de presión diferencial entre dos secciones de medición, separados por una longitud > 10 m, solo es afectado por los cambios en la fricción y de cantidad de movimiento cinético entre estas dos secciones. Adicionalmente se debe cumplir que el producto de la distancia entre las dos secciones de medición y la velocidad media en la tubería a plena carga sea > 50 m²/s.
- Variante 2. Método diagramas separados. En esta variante del método presión-tiempo, los cambios en la presión de medición en dos secciones transversales del conducto se registrarán por separado mediante dos transductores de presión manométricos, en particular, la distancia entre las dos secciones debe ser > 50 m.
- Variante 3. Método de diagramas separados comparando con el nivel del agua. En esta variante del método presión-tiempo, los cambios en la presión de medición en dos secciones transversales del conducto se registrarán por separado utilizando sólo una

sección de medida, comparándola con la superficie libre del agua, sin embargo, esta variante sólo puede utilizarse si hay una torre de oscilación para medir el tirante y además la geometría de la tubería desde el embalse hacia la sección de medición no debe ser demasiado compleja (forma abocinada), no debe superar el 2 % de la longitud total.

Las variantes del método sólo difieren en la instrumentación y en la técnica de cálculo de la integral presión-tiempo, también por la adquisición de datos separados o diferenciales. (pp. 35-36)

2.3.4. Método ultrasónico

Dos tipos de medidores ultrasónicos son utilizados, fundamentalmente, para la medida de caudal en circuitos cerrados. El primero (tiempo de tránsito o de propagación) utiliza la transmisión por impulsos, mientras que el segundo (efecto Doppler) usa la transmisión continua de ondas.

Los medidores ultrasónicos modulados por impulsos son los más precisos y se utilizan, preferentemente, con líquidos limpios, aunque algunos tipos permiten medidas de líquidos con cierto contenido de partículas y gas. El método diferencial de medida por tiempo de tránsito se basa en un sencillo hecho físico. Si imaginamos dos canoas atravesando un río sobre una misma línea diagonal, una en el sentido del flujo y la otra en contra del flujo, la canoa que se desplaza en el sentido del flujo necesitará menos tiempo en alcanzar su objetivo. Las ondas ultrasonoras se comportan exactamente de la misma forma.

El efecto Doppler puede entenderse fácilmente si se considera el cambio que se produce en la frecuencia cuando un tren se mueve hacia un observador

con su bocina sonando. Cuando el tren se acerca, la bocina es percibida por el observador con una graduación de tono más alta, ya que la velocidad del tren da lugar a que las ondas sonoras sean más próximas que si el tren estuviera parado. De igual manera, si el tren se aleja aumenta el espaciamiento, dando como resultado una graduación de tono o frecuencia más baja. Este aparente cambio en la frecuencia se denomina efecto Doppler y es directamente proporcional a la velocidad relativa entre el objeto móvil, el tren, y el observador.

Los medidores ultrasónicos de tipo Doppler utilizan el concepto de que, si se deja pasar el ultrasonido en un fluido en movimiento con partículas, el sonido será reflejado de nuevo desde las partículas. La variación de frecuencia del sonido reflejado será proporcional a la velocidad de las partículas.

Al igual que en el caso de los medidores magnéticos, los medidores de caudal por ultrasonidos no presentan obstrucciones al flujo, no dan lugar a pérdidas de carga, por lo que son adecuados para su instalación en grandes tuberías de suministro de agua, donde es esencial que la pérdida de carga sea pequeña. Los transductores son incorporados en el cuerpo del medidor, sin necesidad de juntarse con el fluido. No se necesita tubería en derivación ni válvulas de aislamiento, ya que todos los elementos activos pueden reemplazarse sin contacto alguno con el líquido. Para tuberías de diámetros superiores a 400 mm ofrecen una solución competitiva.

Su fácil instalación reduce los costes de mantenimiento, y además la medición, sin apenas pérdida de carga, reduce los costes energéticos (García, 2012).

2.3.5. Método electromagnético

Para García (2012):

El medidor de caudal electromagnético utiliza el mismo principio básico que el electro generador, es decir, cuando un conductor se mueve a través de un campo magnético se genera una fuerza electromotriz en el conductor, siendo su magnitud directamente proporcional a la velocidad media del conductor en movimiento. Si el conductor es una sección de un líquido conductor circulando por un tubo aislado eléctricamente, a través de un campo magnético y se montan los electrodos diametralmente opuestos en la pared de la tubería la fuerza electromotriz generada a través de los electrodos es directamente proporcional a la velocidad media del fluido.

Es importante señalar que la diferencia de potencial entre los electrodos es del orden de milivoltios, por lo que dicha señal tiene que ser amplificada mediante un dispositivo secundario denominado convertidor, que proporciona una señal de salida en miliamperios, en voltios o en impulsos.

Puesto que los electrodos tienen que hacer un contacto con el fluido, su material tiene que ser compatible con las propiedades químicas del fluido que circula. Entre los materiales más utilizados se pueden citar los siguientes: acero inoxidable no magnético, platino/iridio, monel, hasteloy, titanio, y circonio para líquidos particularmente agresivos. (pp. 36-37)

2.4. Pruebas de eficiencia aplicados a centrales hidroeléctricas

La operación óptima de una central hidroeléctrica y la correcta planeación y uso adecuado de los recursos energéticos en un sistema interconectado requiere de una red de monitoreo del recurso hídrico. A nivel mundial existen multitud de normas, estándares, guías y manuales de mejores prácticas para la medición de variables hidrométricas desarrollados por entidades internacionales o nacionales. (González, 2020, p. 5)

En general, los valores reportados en la literatura de la incertidumbre sistemática se pueden tomar como una guía. La medición de las dos principales variables: gasto volumétrico y eficiencia, se lleva a cabo cuando el equipo es instalado por el proveedor y éste debe entregar las garantías mencionadas anteriormente para lo cual se llevan pruebas de aceptación o también, después de alguna modificación en el diseño o de alguna reparación. Después que las turbinas operan durante cierto tiempo, las curvas de eficiencia del equipo pierden vigencia por lo que el gasto se infiere a través de las curvas de eficiencia-gasto obtenidas mediante métodos relativos como el Winter- Kennedy o Gibson. Este último requiere aparatos particularmente buenos y un equipo técnico especializado, para realizar ensayos, comprobar y estimar las incertidumbres en los resultados.

En condiciones adecuadas se puede considerar que tiene una incertidumbre total de $\pm 1.8\%$ a $\pm 2.3\%$ si lleva a cabo de manera tradicional y de $\pm 1.5\%$ - $\pm 2\%$ si se usan métodos numéricos y equipos de adquisición y procedimientos de datos, en ambos casos con un nivel de confianza de 95 %.

Los métodos secundarios, pueden ser considerados como parte de la recepción de la Central sólo cuando estén calibrados por un método primario. Si

se llegan a utilizar, la incertidumbre total del método de calibración viene a ser la incertidumbre sistemática de este tipo de medición, razón por la cual la incertidumbre de estos métodos es más alta del 2.3 %.

Lo más nuevo en instrumentación en centrales hidroeléctricas incluye la medición ultrasónica, su uso es intensivo y extensivo en la industria, precisamente por los buenos resultados que se observan al compararlos con los métodos tradicionales.

Los métodos acústicos han ido avanzando positivamente debido al constante mejoramiento tecnológico. Siempre y cuando cumplan con los requisitos de instalación los cuales están más relacionados con el fenómeno físico que con la electrónica del medidor, los resultados son ampliamente satisfactorios; y se puede considerar que se puede obtener una incertidumbre del $\pm 1\%$ a $\pm 2\%$ en casos conservadores, aunque en la literatura circulan trabajos en los que se afirman se han conseguido incertidumbres menores al $\pm 1\%$.

Después de lo mencionado anteriormente se puede concluir que los requerimientos en cuanto a incertidumbre total son del orden del $\pm 1\%$ a $\pm 2\%$ con un nivel de confianza del 95 % como mínimo.

Otro requerimiento de la medición en centrales hidroeléctricas es que los resultados de la medición puedan ser monitoreados en tiempo real. El tiempo normal de monitoreo lo decide el organismo contratante de acuerdo con su necesidad, no obstante, es una práctica común que sea cada 15 segundos.

Por ejemplo, sí se aplica el método de Winter – Kennedy para obtener caudales el resultado obtenido (lecturas puntuales) se extrapola en el tiempo, es decir, el caudal y la eficiencia para cierta carga y gasto circulante se extrapolan

a otros gastos y cargas hidráulicas que caen dentro de los intervalos para los cuales se tienen resultados de ensayos. Mientras que con la medición por métodos ultrasónicos se adquieren datos tanto de las variables de medición (carga hidráulica H , nivel del embalse, nivel del desfogue, apertura del distribuidor, entre otros) como de las variables calculadas (potencia mecánica, potencia eléctrica, gasto, eficiencia, entre otros) y éstas pueden ser visualizadas en tiempo real, en vista de ello, es posible utilizar esta información como una base sólida en la toma de decisiones no sólo en cuanto a la operación de una central sino de todo el sector de distribución eléctrica.

Los datos obtenidos durante la medición en tiempo real se respaldan electrónicamente y son enviados periódicamente a las oficinas centrales para su almacenamiento, distribución y análisis pertinentes.

El rango de medición de gastos en centrales con gran potencial hidráulico varía de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ – $300 \text{ m}^3/\text{s}$, las de mediana capacidad desde $50 \text{ m}^3/\text{s}$ - $150 \text{ m}^3/\text{s}$ mientras que las de menor capacidad van $30 \text{ m}^3/\text{s}$ - $75 \text{ m}^3/\text{s}$.

Por otro lado, cualquiera que sea el método para que una medición se considere válida es necesario que el flujo esté en estado permanente o cuasi-permanente cada vez que se lleve a cabo una prueba. También se recomienda que durante la prueba se vayan graficando los caudales medidos contra tiempo para evaluar la naturaleza y extensión de posibles perturbaciones.

Se recomienda evitar fugas tanto como sea posible, infiltraciones o desvío de flujo, antes o en la sección de medición durante el tiempo que se esté llevando a cabo las pruebas (Pedroza, 2016).

3. ESTUDIO TÉCNICO

La eficiencia de una central hidroeléctrica es dada por el producto de la eficiencia de todos los equipos que influyen en el proceso de generación de energía eléctrica, por lo que detallaremos cada equipo de la central hidroeléctrica Mopa para proceder a realizar el análisis de la eficiencia del grupo turbina - generador.

3.1. Obras hidráulicas de la central

Se detallan todas las obras con las cuales se realiza el manejo del recurso hídrico para el aprovechamiento para la central hidroeléctrica Mopa.

3.1.1. Presa

La central hidroeléctrica utiliza el agua del río Mopa y tiene un caudal de diseño de $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$, deriva el agua con una presa de mampostería de 6.15 m de altura y 20 m de ancho, es de tipo agua fluyente, lo que deriva de agua es reintegrado al río en su totalidad sin almacenar por periodos de tiempo ni guardar el agua para turbinar posteriormente, la misma es utilizada de manera inmediata y devuelta íntegramente al río.

Esta presa fue construida en 1930 y se dejó de utilizar en 1970 por abandono de la central, fue reparada en su estribo izquierdo el cual fue reconstruido para su adecuado funcionamiento debido a que fue dañada en el período que estuvo sin uso, para esto se construyó un sifón para poder transportar el caudal derivado hacia el inicio del canal.

3.1.2. Canal

El agua es transportada desde la presa hasta cámara de carga en una trayectoria de 2.11 km por medio de un canal de conducción de concreto el cual en su diseño consta con secciones rectangulares y trapezoidales de acuerdo con las áreas disponibles para la ejecución de este y tiene la capacidad de transportar el caudal de diseño de la turbina.

La sección trapezoidal tiene una dimensión inferior de 1.5 m y una superior de 2.3 m, con una altura de 0.8 m y la sección rectangular tiene una base de 1.90 m y una altura de 1 m, para hacer el cambio de una sección rectangular a trapezoidal se realiza por medio de transiciones no abruptas para que no exista rebalse de caudal.

Figura 5. **Canal sección trapezoidal y rectangular**



Fuente: [Fotografía de Daniel Navarro]. (Flores Costa Cuca, Quetzaltenango. 2022).
Colección particular. Guatemala.

3.1.3. Cámara de carga

La cámara de carga tiene un área de 150 m², es esta estructura es donde se mantiene el nivel de agua para poder llenar la tubería de presión y mantener el suministro constante en la misma. En esta área también se realiza la labor de limpieza del agua y el desarenado por medio de una rejilla y un limpiarregas automático el cual es controlado desde el cuarto de control de la central.

Figura 6. Cámara de carga



Fuente: [Fotografía de Daniel Navarro]. (Flores Costa Cuca, Quetzaltenango. 2022). Colección particular. Guatemala.

Para su funcionamiento adecuado se debe de mantener completamente llena y por ser una central de agua fluyente se debe de ingresar a la tubería la misma cantidad de caudal que ingresa a la cámara para mantener el nivel de carga para la que fue diseñada. Si se ingresa más caudal del que consume la turbina está diseñada para que el exceso sea drenado por un canal auxiliar hacia

el río por lo que nunca aumentará la cota y se toma como cota única de carga para la tubería 255.70 msnm, esto debido a que no está diseñado como un embalse de regulación el cual varía su nivel dependiendo de la cantidad de agua almacenada, sino que es constante y se toma en la cota del espejo de agua.

3.1.4. Tubería de presión

El caudal existente en cámara de carga es transportado hacia la turbina ubicada en casa de máquinas por medio de una tubería de presión de 99 m de longitud, la cual es de acero al carbono y tiene un diámetro de 1,200 mm. Dicha tubería está al aire libre montada sobre pedestales de concreto armado reforzado los cuales mantienen su adecuada sujeción y le dan soporte a la misma. Está diseñada de forma que no tiene dobleces abruptos ni picos y capacitada para soportar una presión de trabajo de 6 bar en toda su longitud, juntas y acoples.

Figura 7. Tubería de presión



Fuente: [Fotografía de Daniel Navarro]. (Flores Costa Cuca, Quetzaltenango. 2022). Colección particular. Guatemala.

La caída bruta entre cámara la cota de lámina de cámara de carga y la cota de salida de la turbina es de 53.20 m, por lo que para contrarrestar los empujes hidrodinámicos y el golpe de ariete está reforzada con macizos de concreto en los cambios de dirección.

3.1.5. Canal de desfogue

El agua es reintegrada al cauce natural del río por medio del canal de desfogue de la casa de máquinas, el cual es subterráneo y es donde es evacuada toda el agua captada en la presa y utilizada en el proceso de la generación de energía eléctrica para su restitución al cauce del río.

3.2. Equipos mecánicos

El equipamiento mecánico de una central hidroeléctrica son todos los equipos encargados de trasladar la energía cinética del agua hasta los equipos eléctricos para el proceso de generación de energía eléctrica.

3.2.1. Válvula de entrada

Para poder controlar el paso del agua hacia la turbina en cualquier momento se posee una válvula de cierre con accionamiento eléctrico y manual, la cual está construida en hierro fundido GGG40 y tiene una presión de operación de 1.5 veces la presión nominal de trabajo, una sección de brida libre de DN1200 y está acoplada a la tubería y turbina por medio de dos juegos de juntas de montaje.

Figura 8. **Válvula**



Fuente: [Fotografía de Daniel Navarro]. (Flores Costa Cuca, Quetzaltenango. 2022). Colección particular. Guatemala.

3.2.2. Turbina

La turbina es de tipo *crossflow* de dos cámaras y está diseñada para un caudal de diseño de $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$ y una potencia de salida de 1061 kW, además consta de un rodete de diámetro 800 mm, ancho de 555 mm y con un eje de diámetro de 180 mm.

Está diseñada para una velocidad nominal de 360 rev/ min y 775 rev/min como velocidad para embalaje. Consta de dos cojinetes en cada extremo de su

eje los cuales son de tipo antifricción diseñados para una vida útil de 100,000 horas.

Figura 9. **Turbina *crossflow* de dos cámaras**



Fuente: [Fotografía de Daniel Navarro]. (Flores Costa Cuca, Quetzaltenango. 2022). Colección particular. Guatemala.

La estructura de la turbina funciona con 2 paletas guías separadas y montadas con sus respectivos cojinetes, las cuales regulan el caudal inyectado en cada cámara y poder así regular la apertura de la turbina. Esta posee un tubo de salida de caudal integrado al marco de la placa base el cual drena el agua hacia el canal de desfogue de la casa de máquinas.

Por su forma de construcción de 2 cámaras, esta turbina alcanza su máxima eficiencia del 12 % al 100 % del flujo de diseño, por lo que su rendimiento es muy alto en la curva de caudales turbinables. Esto debido a que puede funcionar independientemente cada cámara y posee una cámara de 1/3 de su

capacidad y otra de 2/3 lo que permite que pueda trabajar hasta en un 10 % de su caudal de diseño.

3.2.3. Caja multiplicadora

Para transmitir la potencia de la turbina al generador síncrono la central posee una caja multiplicadora de revoluciones la cual tiene la función de aumentar de las 354 rev/min revoluciones que gira la turbina a 1200 rev/min que es la velocidad necesaria para de operación del generador eléctrico.

La caja tiene un radio de transmisión de 3.39, está diseñada con un factor de seguridad de 2 veces la salida nominal y consta de sensores de temperatura para mantener monitoreado su adecuado funcionamiento. Los cojinetes de los ejes de salida son tipo antifricción y diseñados para operar más de las 100,000 horas y libres de mantenimiento.

Figura 10. **Caja multiplicadora y sistema de refrigeración**



Fuente: [Fotografía de Daniel Navarro]. (Flores Costa Cuca, Quetzaltenango. 2022). Colección particular. Guatemala.

Dicha caja consta de un sistema de refrigeración y lubricación por aceite, el cual funciona externamente por medio de un radiador enfriado por aire forzado para poder mantener la temperatura del aceite por debajo de 65 °C como parámetro de operación

3.2.4. Acoples Flender

Estos componentes cumplen la función de unir los ejes entre la turbina - caja multiplicadora y caja multiplicadora – generador, por medio de ellos se asegura las conexiones entre equipos de una manera que no exista un sobreesfuerzo que dañe de golpe las juntas.

3.3. Equipos eléctricos

El equipamiento eléctrico de una central hidroeléctrica son todos los equipos encargados de convertir la energía cinética del agua en energía eléctrica, así como también el manejo y conversión de la misma a los niveles de tensión para su generación, medición, control y transporte.

3.3.1. Generador

Se dispone de un generador síncrono diseñado para aplicación específica de hidro generación, su configuración y montaje es de tipo horizontal, sin escobillas, auto excitado, autoventilado, con conexión en estrella y construido según norma IEC 34.

Está configurado para un factor de potencia de 0.9, una potencia nominal de 987 kW y una potencia de salida de 1097 kVA. Su velocidad de funcionamiento es de 1200 rev/min y soporta hasta 2627 rev/min como velocidad de embalaje.

Figura 11. **Generador síncrono**



Fuente: [Fotografía de Daniel Navarro]. (Flores Costa Cuca, Quetzaltenango. 2022). Colección particular. Guatemala.

La tensión a la que genera es de 480 V trifásico a una frecuencia de 60 Hz. Tiene una protección IP 23, refrigeración IC 01 y una categoría de aislamiento H/F.

Está soportado en los extremos de su eje por medio de dos cojinetes antifricción diseñados para 100,000 horas de trabajo. Posee resistencias de calentamiento para anti-congelamiento de los devanados y cinco sensores de temperatura para monitorear la temperatura de cada bobinado e interna del generador.

3.3.2. Armario control

Este armario está diseñado para poder controlar todos los procesos de la central hidroeléctrica Mopa, está dividido en el apartamento RG1 de tensión de 480 V que es el voltaje de generación en el cual controla la conexión y desconexión del generador a la red y la parte de baja tensión DT1 la cual posee toda la instrumentación para monitorear y controlar el correcto funcionamiento de la central.

Figura 12. Armario de control



Fuente: [Fotografía de Daniel Navarro]. (Flores Costa Cuca, Quetzaltenango. 2022). Colección particular. Guatemala.

Desde el armario se manejan todas las protecciones de red eléctrica y del generador, entre las cuales tenemos de bajo voltaje, sobrevoltaje, baja frecuencia, sobre frecuencia, sobre corriente, desequilibrio de corriente entre fases, de potencia inversa, cambio de vector, cortocircuito, falla del interruptor del generador, protección diferencial, protección contra sobretensiones de 3+1 polos con señalización óptica, interruptor del generador principal y medidor de potencia.

3.3.3. Transformador de potencia

Es un transformador de marca Trafoelettro de tipo seco trifásico, con aislante de resina para instalación en interiores y con un ciclo de carga de servicio continuo. Cumple con la norma IEC 60076 y tiene una potencia de 1,500 kVA, está diseñado para operar a una frecuencia de 60 Hz.

Figura 13. **Transformador seco**



Fuente: [Fotografía de Daniel Navarro]. (Flores Costa Cuca, Quetzaltenango. 2022). Colección particular. Guatemala.

Está construido con una carcasa metálica aterrizada para minimizar el riesgo eléctrico por contacto debido a que está instalado dentro del recinto de casa de máquinas y cuenta con refrigeración AN/AF. Su acometida de baja tensión en 480 V está en la parte superior del transformador, y es conducida de las barras de generación al transformador por canalización metálica.

La acometida de media tensión 13.8 kV es en la parte inferior por medio de una acometida aéreo-subterránea con cable diseñado para dicha aplicación hacia la línea de distribución donde se conecta para entregar la energía generada. En la tabla 1 se detallan las características de sus devanados.

Tabla I. **Características de devanados**

Primario		
Voltaje nominal	13.8	kV
Corriente nominal	62.76	A
Material	Aluminio	
Cambiador de taps	Sin carga	
Taps	±2x2.5 %	%
Voltaje máximo	17,5	kV
Voltaje inducido CA	38	kV
Tensión de impulso de rayo	95	kV
Tipos de terminales	Embarrado 100x10 aluminio	
Número de terminales	3	
Grado de protección terminales	IP 00	
Secundario		
Voltaje nominal	0,48	kV
Corriente nominal	1804,22	A
Material	Aluminio	
Taps	-	%
Voltaje máximo	1,1	kV

Continuación tabla I.

Voltaje inducido CA	3	kV
Tensión de impulso de rayo	-	kV
Tipos de terminales	Esparrago M12 latón	
Número de terminales	3+1	
Grado de protección terminales	IP 00	

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3.4. Sistema de control

La central es controlada por medio de un sistema de control el cual es ejecutado por un PLC simatic S7 siemens en donde se reciben todas las señales de entrada y salidas de las variables monitoreadas en el proceso de generación de energía. Dicho sistema de control da la versatilidad para poder operar la central de forma automática sin atención de personal o de forma manual con control de personal calificado.

El operador tiene dos formas para interactuar con sistema de control, la primera es por medio de una pantalla táctil de 10.4" montada en la puerta del armario de control en la cual el SCADA da todos los parámetros de control y configuraciones para poder realizar la operación de la central y la segunda forma es por medio de un computador que tiene programada una interfaz para poder realizar la operación y configuración.

En este sistema es posible visualizar el estatus del proceso de generación en tiempo real y monitorear todas las variables medidas, además también se pueden visualizar archivos de datos con registros de eventos diarios, así como el registro de las variables medidas y la producción registrada de forma horaria, diaria, mensual y anual.

El sistema también permite garantizar las paradas de la central en caso de identificar una avería o un parámetro fuera de rango de operación con lo cual detiene el funcionamiento de la central inmediatamente hasta subsanar la avería. Entre los parámetros monitoreados están las temperaturas de cojinetes de generador, caja de revoluciones, cojinetes de generador, devanados del generador, aceite de caja, armario de control, sala de máquinas presión de tubería, revolución del generador, presión del sistema hidráulico, apertura de válvula de admisión de la turbina, apertura de alabe 1, apertura de alabe 2, nivel de agua y apertura de turbina global.

3.5. Análisis de variables que influyen en la eficiencia de la central hidroeléctrica Mopa

De acuerdo con (Hidraes Ingenieros Consultores, 2014), la eficiencia de una central hidroeléctrica está dada en función del producto de la eficiencia de sus equipos influyentes en el proceso de generación de energía eléctrica, la fórmula de potencia está dada por:

$$Pch = Q * Hn * g * Rturb * Rgen * Rtrafo \quad (2)$$

Donde:

Pch: potencia generada en kW

Q: caudal turbinado instantáneamente en m³/s

H: Salto neto en m

g: gravedad en m/s²

Rturb: eficiencia de la turbina

Rgen: eficiencia del generador

Rtrafo: eficiencia del transformador

Por lo que para calcular la eficiencia del grupo turbina – generador de la central hidroeléctrica mopa necesitamos conocer el salto neto, el caudal turbinado instantáneamente y la potencia generada instantánea para toda la curva de generación. Se define como eficiencia grupo turbina el producto de las eficiencias de la turbina y generador.

3.5.1. Salto neto

El salto neto instantáneo es la altura técnicamente utilizable en el proceso de generación de energía y es la caída neta medida entre la cota de espejo de agua superior en la obra donde se capta el agua y la cota de salida del agua en la obra donde se descarga la misma. Esta puede variar conforme a las pérdidas en tubería por fricción que existen en el traslado del caudal de un punto a otro, y también por la variación de cotas de lámina superior por el nivel que pueda tener el embalse a la hora de turbinar.

En el caso de la central Mopa se tiene que es una central a filo de agua y no de embalse por lo que se descarta que la cota lámina de agua superior en obra de captación pueda variar ya que la cámara de carga está diseñada para funcionar completamente llena, respetando la cota de 255.70 m.s.n.m., para la cual fue construida.

Por lo que para el tema hidráulico de la central en estudio solo es necesario analizar las pérdidas en tubería para determinar el salto neto exacto al que opera la central la cual será específica para cada caudal turbinado. Esta se obtiene de la diferencia entre la cota de lámina superior y lámina de desfogue, de la cual se restará la caída equivalente por pérdidas por fricción en tubería.

3.5.2. Caudal instantáneo

Para calcular la eficiencia es necesario monitorear el caudal instantáneo turbinado para cada potencia generada en la curva de caudales, esta variable es uno de los parámetros más difíciles de monitorear debido a que la instrumentación para realizarlo es intrusiva y provoca pérdidas en producción por instalación y el monitoreo de este.

3.5.3. Potencia Instantánea

Este parámetro es necesario calcularlo por medio de otros parámetros medidos con instrumentación midiendo el voltaje por cada fase, corriente por fase y factor de potencia instantáneo del generador, con esto obtenemos la potencia generada en bornes de generador.

Dicho parámetro lo podemos monitorear desde el scada con datos a cada 30 segundos los cuales pueden ser almacenados en un registro histórico. Se debe poder monitorear la potencia en bornes de generador y en bornes de transformador para poder realizar el cálculo de la eficiencia del transformador

3.5.4. Eficiencia del transformador

Para estimar la eficiencia del transformador necesitamos la potencia eléctrica de entrada y salida en toda la curva de potencia generada, esto lo obtenemos de la medición de potencia del generador eléctrico que es la potencia de entrada del transformador y de la medición de entrega de la energía a la red eléctrica que es el punto de salida del transformador.

Se debe estimar cada dato instantáneo de potencia de salida y entrada del transformador para todos los caudales posibles de turbinar para posterior cálculo de eficiencia del grupo turbina - generador

3.5.5. Eficiencia del generador

Para estimar la eficiencia del generador es necesario calculemos la potencia mecánica de entrada proveniente de la turbina y la salida de potencia eléctrica en bornes de generador en toda la curva de potencia generada, esto lo obtenemos del cálculo de potencia de salida de la turbina y de la medición de entrega de la energía en bornes de generación a 480 V que es el punto de salida de potencia del generador.

Se debe estimar cada dato instantáneo de potencia de salida y entrada del generador para todos los caudales posibles de turbinar para posterior cálculo de eficiencia del grupo turbina – generador.

3.5.6. Eficiencia de la turbina

Dicha eficiencia está indicada por el cociente de la potencia de salida y la potencia de entrada de la turbina, esta potencia de entrada es la obtenida por el aprovechamiento de la caída de agua y el caudal utilizado instantáneamente para el movimiento cinético de la turbina.

4. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Para analizar la eficiencia de la central hidroeléctrica Mopa, necesitamos medir el caudal turbinado instantáneo, calcular el salto neto para cada caudal medido y medir la potencia de salida correspondiente, todos los parámetros instantáneamente para calcular la eficiencia correspondiente a cada punto de la curva de potencia generada.

4.1. Medición caudal

Se realizará la medición del caudal turbinado instantáneamente por medio de un medidor de flujo ultrasónico híbrido DXN Dynasonics con el cual se puede medir el caudal que ingresa a la turbina por medio de sensores ultrasónicos los cuales deben de ser instalados en la entrada de la turbina.

Las principales características del medidor se detallan en la siguiente tabla

Tabla II. **Características de medidor de flujo ultrasónico**

Entradas/salidas de monitoreo de procesos	Descripción
Conector	DSUB de alta densidad de 15 pines
Caja de conexiones	terminal de tornillo de desconexión rápida de 0.2 pulg.; 15 pines a caja adaptadora; 6 pies (1.8 m) de cable (conectores DSUB a DSUB)
Entrada RTD	Pestaña Energía/Temperatura (2) tipo RTD PT1000. Puede manejar varios rangos de temperatura de -58 a 392 °F (-50 a 200 °C), según el tipo de RTD

Continuación tabla II.

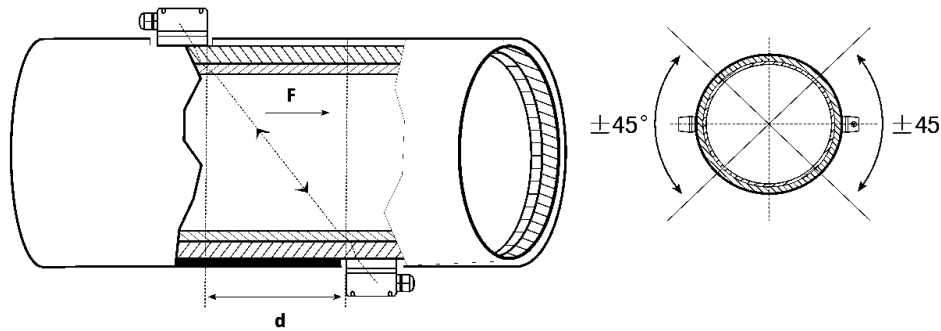
Salida de corriente	4 - 20 mA activo/pasivo 1 % precisión
Entrada de voltaje	0 - 5 V o 0 - 10 V, 1 % de precisión, escalado y control de software, impedancia de entrada de 80 k ohmios, capacidad de registro de datos
Salida de voltaje	Tensión de salida de 0 - 5 V o 0 - 10 V, 1 % de precisión, escalado y control de software, impedancia de salida de 100 ohmios
Suministro de sensores	14 V a 50 mA máx. para alimentar sensores de corriente o voltaje
Salida digital	Colector abierto, pull-up externo; Tasa o pulso total seleccionable por el usuario
	Tasa de Pulso de 0 a 1000 Hz, total: 33 ms de duración
Entrada digital	Restablecimiento del totalizador, pull-up externo, <i>software</i> habilitado

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Se deben de instalar los sensores en un sitio adecuado para el montaje, el cual debe de localizarse en un espacio donde la tubería sea recta sin codos ni cambios abruptos, se debe de verificar que los transductores no estén instalados con alguna válvula o elemento diferente que altere el flujo del agua. Para instalar los transductores debe de estar limpia y seca la superficie de la tubería sin restos de pintura ni óxido.

Por el diámetro de la tubería se deben de instalar los transductores en configuración tipo Z, los cuales deben estar configurados según la figura a 45° del eje y deben tener una distancia de separación 'd', la cual es indicada por el medidor luego de ingresar los parámetros de la tubería, material de tubería, grosor, y líquido a medir.

Figura 14. Configuración transductores conexión Z



Fuente: elaboración propia, empleando AutorCAD.

4.2. Cálculo del salto neto

Para calcular el salto neto del aprovechamiento es necesario conocer las pérdidas de carga que se producen en cada uno de los diferentes elementos que lo forman.

Según Hidraes Ingenieros Consultores (2014), en el diseño final de la central Mopa, la ecuación utilizada para la determinación de las pérdidas de carga por rozamiento longitudinal dentro de la tubería consiste con la ecuación de Hazen Williams la cual arroja buenos resultados hasta diámetros de 3 m de diámetro por lo que estamos dentro de los parámetros. Dicha ecuación es la que se muestra a continuación:

$$D = \left(\frac{10.643 * Q^{1.852} * L}{h_f * C^{1.852}} \right)^{\frac{1}{4.87}} \quad (3)$$

Donde:

D: diámetro de tubería en m

hf: pérdidas de carga en m

C: coeficiente de fricción de Hazen Williams adimensional

Q: caudal circulante en tubería en m³/s

L: longitud de tubería en m

Las pérdidas en la tubería variarán de acuerdo con el diámetro interior de la misma. En este caso al tratarse de una tubería relativamente corta el diámetro nominal es el mismo en toda su longitud.

4.2.1. Pérdidas de carga en la rejilla de toma

La expresión de la pérdida de carga localizada en la rejilla corresponde a la expresión generalizada para pérdidas de carga locales y la misma se muestra a continuación:

$$\Delta H = K * \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

Donde:

ΔH : pérdida de carga en m

V: velocidad en la embocadura m/s

G: gravedad en m/s²

K: coeficiente adimensional de pérdida de carga que depende del área de las rejillas y el cuál se define de acuerdo con la siguiente expresión.

Para este caso:

- An: Área neta, 1.85 m²
- Ab: Área bruta, 2.78 m²

Para las condiciones citadas se obtiene un coeficiente de pérdidas de 0.709 y una pérdida de carga de 0.0269 m para una velocidad del flujo de 0.86 m/s.

En función del caudal turbinado y la información indicada anteriormente, las pérdidas de carga serán según la ecuación (4):

$$\Delta H = \frac{0.709 * Q^2}{2 * g * A_{flujo}^2} = 0.00467 * Q^2$$

4.2.2. Pérdidas de carga en embocadura de tubería

La expresión de la pérdida de carga localizada en la embocadura será según la ecuación (4) antes indicada, para el caudal de equipo Q= 2.40 m³/s, y con un diámetro de la embocadura de la tubería de 1,200 mm, la pérdida de carga resultante es:

$$V = \frac{Q}{A_{entr}} = \frac{2.40}{0.785} = 3.06 \text{ m/s}$$

$$\Delta H = 0.23 * \frac{3.06^2}{2g} = 0.10 \text{ m}$$

En función del caudal turbinado las pérdidas de carga serán igual a:

$$\Delta H = 0.23 * \frac{Q^2}{2 * g * A_{entr}} = 0.0109 * Q^2$$

4.2.3. Pérdidas de carga en los codos

El cálculo de pérdidas de carga en los codos se realizará según la ecuación (4) para este caso siendo:

K= coeficiente en función del ángulo de giro de la conducción x. Se utiliza la tabla propuesta en López (2004) para codos con ángulo vivo:

$$K = 0.9457 \sin^2\left(\frac{x}{2}\right) + 2.047 \sin^4\left(\frac{x}{2}\right) \quad (5)$$

Por lo que, con el caudal de equipo, la pérdida de carga será dada por 0.0493 m. y con caudal cualquiera la pérdida de carga será:

$$\Delta H = 0.0085 * Q^2$$

4.2.4. Pérdidas de carga en disminución de la tubería

El diámetro de la tubería es de 1,200 mm (DN1200), sin embargo, para la entrada al grupo generador se reduce hasta 1,000 mm de acuerdo con las dimensiones requeridas. La pérdida de carga en estas situaciones se calcula con la ecuación (4) para estos parámetros resulta K = 0.22 por lo que se sustituye:

$$\Delta H = 0.22 * \frac{V^2}{2g}$$

Para el caudal de equipo $Q = 2.40 \text{ m}^3/\text{s}$, y con una reducción del diámetro interior de 1,200 mm a 1,000 mm, la pérdida de carga resultante es:

$$V_{promedio} = 2.58 \text{ m/s}$$

$$\Delta H = 0.22 * \frac{2.58^2}{2g} = 0.741 \text{ m}$$

En función del caudal turbinado las pérdidas de carga serán igual a:

$$\Delta H = 0.22 * \frac{Q^2}{(2g * A_{prom}^2)} = 0.0122 * Q^2$$

4.2.5. Pérdidas de carga en cono de válvula

El último tramo de la tubería es de 1,200 mm de diámetro junto con la válvula de acceso a la turbina; sin embargo, a la entrada de la válvula presenta una reducción a un diámetro debido al anillo de sello. La pérdida de carga en estas situaciones se calcula con la misma ecuación de pérdidas locales mostrada anteriormente pero el coeficiente de pérdida depende en este caso del ángulo de reducción presentado (reducciones de sección brascas).

Para un ángulo de reducción de 14.86° en la válvula se tiene un coeficiente de pérdidas de 0.184, la pérdida de carga se calcula sustituyendo la ecuación (4).

$$K = 0.184$$

$$\Delta H = 0.184 * \frac{V^2}{2g}$$

Para el caudal de equipo $Q = 2.40 \text{ m}^3/\text{s}$, y con el diámetro de 1,200 mm a 1,000 mm, la pérdida de carga resultante es:

$$V_{promedio} = 4.36 \text{ m/s}$$

$$\Delta H = 0.184 * \frac{4.36^2}{2g} = 0.366 \text{ m}$$

Por lo que en función del caudal turbinado las pérdidas de carga serán igual a:

$$\Delta H = 0.184 * \frac{Q^2}{(2g * A_{prom}^2)} = 0.0637 * Q^2$$

4.2.6. Pérdidas de carga en la válvula

El diámetro de la válvula será de 1,200 mm (DN1200), la cual está situada a la entrada de la turbina, está producirá una pérdida de carga por oposición del plato cuyo cálculo se realizará con la ecuación (4), siendo K el coeficiente de pérdidas en función del tipo de válvula, el espesor de la compuerta y el porcentaje de abertura de esta. Según norma AWWA M11, para válvulas mariposa, $K = 0.50$. Las pérdidas de carga para el caudal de equipo $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$ y diámetro interior en la válvula, resultan:

$$\Delta H_{valv} = 0.115$$

Para un caudal genérico Q se obtiene una pérdida de energía en la válvula de:

$$\Delta H_{valv} = 0.0199 * Q^2 m$$

En total las pérdidas de carga para el caudal de diseño y para cada grupo generador son las siguientes:

Tabla III. **Pérdidas de carga totales en tubería**

Pérdidas	(m)
Rejilla de entrada	0.0269
Embocadura tubería	0.1
Codos	0.0493
Ampliación de tubería	0.0741
Conos de válvula	0.366
Válvulas	0.115
Total	1.398

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de 10. Hidraes Ingenieros Consultores (2014).

Diseño final de Hidroeléctrica Mopa.

4.2.7. Salto neto

El salto neto será igual al salto útil menos las pérdidas de carga, continuas y localizadas, producidas a lo largo de la tubería, desde la entrada hasta la turbina.

El salto útil en una turbina *crossflow* sin campana de sumergencia viene dado por la cota de la lámina de agua en la entrada de la tubería (nivel normal de operación en antecámara) y la cota del eje de la turbina en la casa de máquinas.

Entonces:

$$\text{Salto útil} = \text{Cota lamina de agua} - \text{Cota de eje} \quad (6)$$

$$\text{Salto Útil} = 255.70 - 202.5 = 53.20 \text{ m}$$

Según Castro (2017) el salto neto disponible para el caudal de diseño correspondiente a la turbina será:

$$H_n = H_b - H_{pm} \quad (7)$$

Donde:

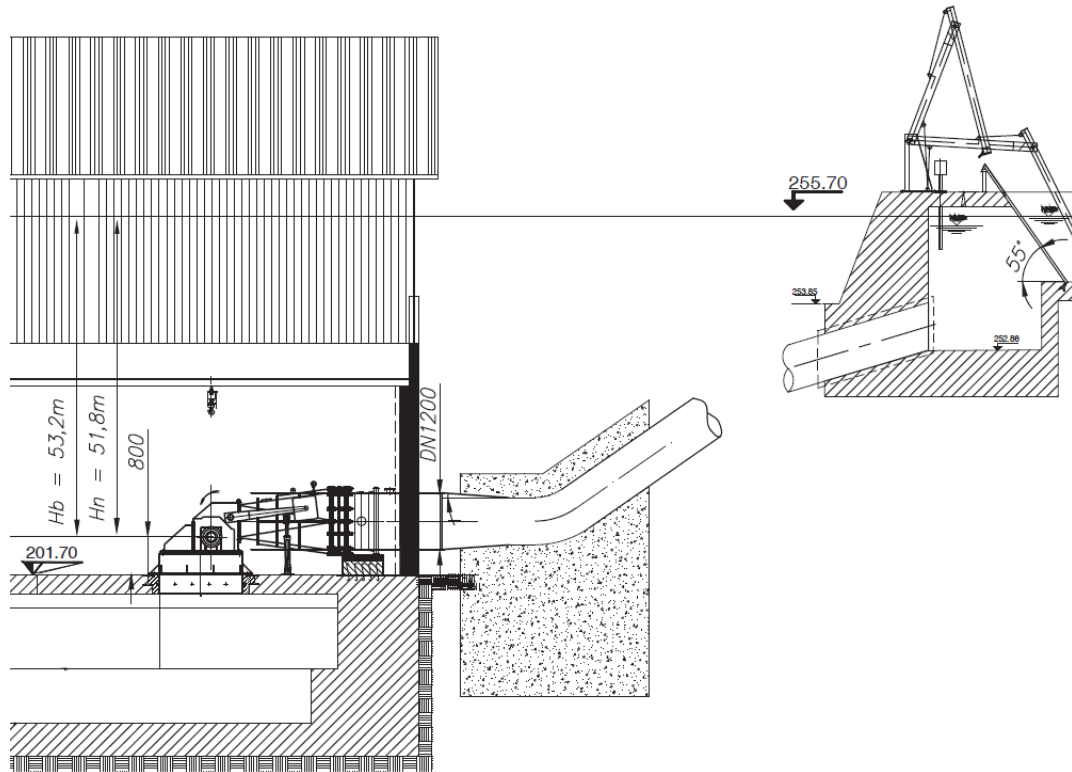
H_n : salto neto en m

H_b : salto útil en m

H_{pm} : pérdidas de carga en m

Por lo que para la central Mopa H_n será de 51.8 m.

Figura 15. **Plano cotas de salto neto**



Fuente: Hidraes Ingenieros Consultores (2014). *Diseño final de Hidroeléctrica Mopa.*

4.3. **Medición de potencia generada**

Para medir la potencia de la central Mopa utilizaremos un medidor de energía Siemens Sentron PAC3200, en el cual podemos medir la potencia generada en los bornes del generador tanto activa, reactiva y aparente, además de esto podemos medir los voltajes de fase a fase y de fase a neutro, corriente de cada fase para cada potencia generada.

Figura 16. **Medidor de energía Sentron PAC3200**

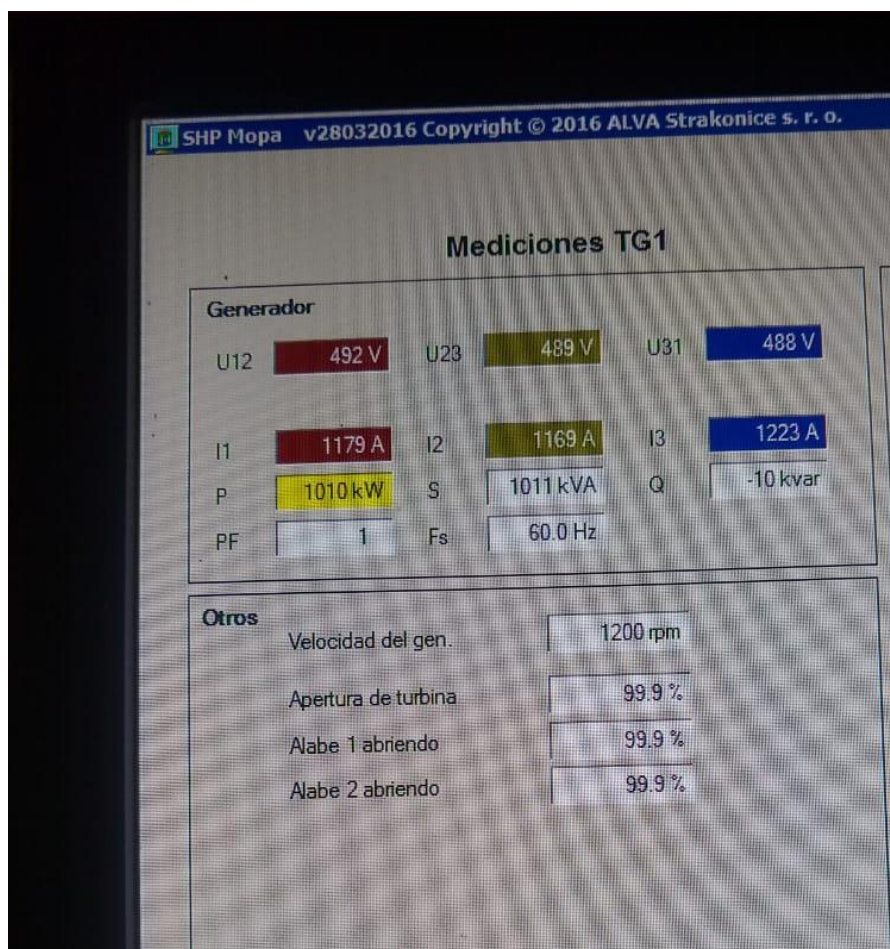


Fuente: [Fotografía de Daniel Navarro]. (Flores Costa Cuca, Quetzaltenango. 2022). Colección particular. Guatemala.

Se debe de tomar en cuenta que se miden los parámetros en la barra de generador donde el voltaje es de nivel de 480 V, por lo que los parámetros de corriente corresponden para este nivel de tensión. Se debe de medir cada parámetro para cada medición de potencia de la central.

También se observarán los parámetros de tensión, corriente y voltaje desde el SCADA de la central para corroborar que los datos medidos por el medidor de energía sean los correspondientes a la potencia generada.

Figura 17. Medición de Scada de central Mopa



Fuente: [Fotografía de Daniel Navarro]. (Flores Costa Cuca, Quetzaltenango. 2022). Colección particular. Guatemala.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después de realizadas las mediciones correspondientes para cada porcentaje de apertura de la turbina se presentan los resultados obtenidos de la medición de caudal con su respectiva potencia generada en la tabla siguiente

Tabla IV. **Caudales turbinados medidos**

No. Medición	Apertura turbina %	Potencia real kW	Potencia aparente kVA	Caudal turbinado m³/s
1	10	31	49	0.24
2	12	52	62	0.29
3	17	111	109	0.41
4	20	145	155	0.48
5	30	270	289	0.72
6	40	390	397	0.96
7	50	495	498	1.20
8	60	598	601	1.44
9	70	690	694	1.68
10	80	770	773	1.87
11	90	890	892	2.16
12	100	984	987	2.40

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Con los caudales obtenidos por la medición ultrasónica podemos calcular las eficiencias para el grupo turbina generador con la fórmula de la eficiencia

tomando como eficiencia del grupo turbina – generador el producto de la eficiencia del generador y turbina, los cuales se presentan en la tabla V.

Tabla V. **Eficiencia de grupo turbina generador calculados**

No. Medición	Potencia real kW	Caudal turbinado m³/s	Hneta m	Eficiencia grupo %
1	31	0.24	51.800	25.42
2	52	0.29	51.800	35.53
3	111	0.41	51.800	53.54
4	145	0.48	51.800	59.45
5	270	0.72	51.800	73.80
6	390	0.96	51.800	79.95
7	495	1.20	51.800	81.18
8	598	1.44	51.800	81.72
9	690	1.68	51.800	80.82
10	770	1.87	51.800	81.03
11	890	2.16	51.800	81.08
12	984	2.40	51.800	80.68

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Podemos observar en los resultados que, la eficiencia de los equipos es más alta a partir del 20 % de apertura de la turbina y su valor más alto de eficiencia es al operar al 60 % de apertura de los alabes.

Por aparte en las especificaciones del fabricante Cink Hydro-Energy (2014), se observa que las eficiencias del grupo turbina – generador ha disminuido con respecto a los parámetros de las pruebas hechas por el fabricante para entrega de equipos, pero se mantienen en valores tolerables disminuyendo

como máximo un 2.78 % de la eficiencia de acuerdo con los valores indicados por el fabricante los cuales se presentan en la tabla VI.

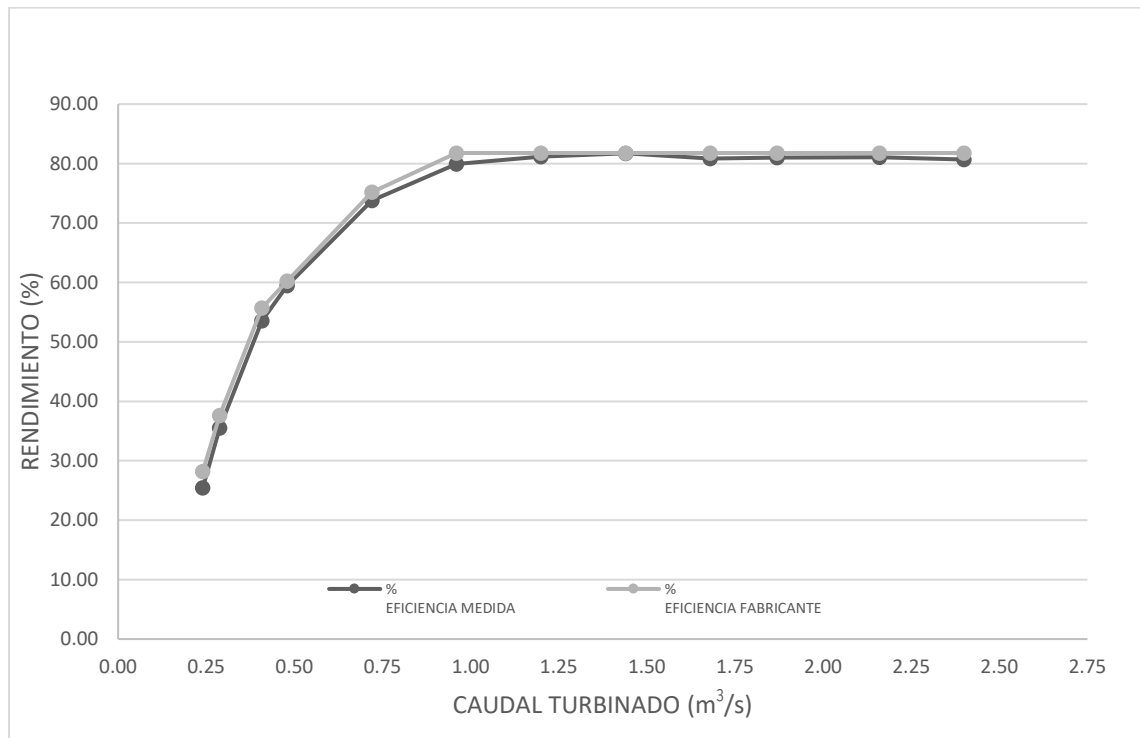
Tabla VI. **Pérdida de eficiencia de grupo turbina-generator Mopa**

No. Medición	% Eficiencia grupo	% Eficiencia fabricante	% Eficiencia pérdida
1	25.42	28.2	2.78
2	35.53	37.6	2.07
3	53.54	55.7	2.16
4	59.45	60.2	0.75
5	73.80	75.2	1.40
6	79.95	81.78	1.83
7	81.18	81.78	0.60
8	81.72	81.78	0.06
9	80.82	81.78	0.96
10	81.03	81.78	0.75
11	81.08	81.78	0.70
12	80.68	81.78	1.10

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Por último, podemos analizar el rendimiento de la turbina en cuanto al consumo del recurso hídrico y las especificaciones de fábrica. En la figura 18 se ve su comportamiento estable por lo que se puede concluir que equipos trabajan de forma normal, y se concluye que la disminución de la eficiencia se debe a un desgaste normal de la turbina.

Figura 18. Curva de rendimiento de turbina



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

CONCLUSIONES

1. Los equipos de la central hidroeléctrica Mopa se encuentran dentro del rango permisible, menor al 10 % de pérdida de eficiencia, que indican los fabricantes de los equipos ya que lo máximo que ha disminuido la eficiencia es en un 2.78 % para una apertura de 10 % de la turbina.
2. Al analizar las lecturas de la producción energética de la hidroeléctrica Mopa y compararlas con las mediciones de caudales turbinados obtenidos con el medidor ultrasónico, son congruentes los valores de caudal consumidos por la turbina con la energía entregada en bornes del generador por lo que se concluye que los equipos se encuentran funcionando óptimamente.
3. Los parámetros que influyen en la eficiencia de la central hidroeléctrica son el caudal turbinado instantáneo y el salto neto debido a que las pérdidas en tubería dependen del valor del caudal turbinado.
4. Entre los beneficios de utilizar el medidor de caudal es el poder cuantificar el recurso hídrico utilizado para generar la energía eléctrica e identificar los caudales en los cuales la central trabaja con mayor eficiencia y evaluar así el estado de los equipos y detectar una falla prontamente.
5. Se logra mejorar la eficiencia de la central monitoreando el caudal exacto turbinado, ya que se puede operar la planta en los caudales identificados en donde la central trabaja con mayor eficiencia, para que nos produzca menos pérdidas tanto en la tubería como en la turbina.

RECOMENDACIONES

1. Instalar un medidor de caudal ultrasónico permanentemente para monitorear en tiempo real la operación de la central y evaluar el uso del recurso hídrico para la generación de energía.
2. Verificar mensualmente la eficiencia del grupo turbina-generador para evaluar el estado de los equipos y prevenir tiempos muertos de generación por una falla grave de los mismos.
3. Utilizar siempre equipos de medición ultrasónica no intrusiva de caudal para evitar realizar modificaciones a la tubería de presión y así no detener la operación de la hidroeléctrica al realizar la medición de eficiencia del grupo turbina-generador.
4. Realizar una medición de eficiencia de la central en época seca y en época húmeda para ayudar en la toma de decisiones en mantenimientos preventivos, predictivos y correctivos.
5. Ejecutar el mantenimiento anual adecuado a los instrumentos de la central para obtener datos confiables a la hora de evaluar la eficiencia de la central.
6. Revisar semestralmente la calibración de los transductores ultrasónicos y su correcta instalación para evitar datos erróneos en la medición y obtener una evaluación de la eficiencia correcta.

REFERENCIAS

1. Alegret, E., y Martínez, Y. (marzo de 2019). Coeficiente de Hazen-Williams en función del número de Reynolds y la rugosidad relativa. *Ingeniería hidráulica y Ambiental*, 40(3), 41-55. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382019000300041&lng=es&tlng=es.
2. Beltrán, A., Gracia-León, H., y Rodríguez-Urrego, D. (julio de 2018). Diseño y cálculo de una central híbrida solar-hidráulica en Gran Canaria. *Dyna*, 85(206), 250-257. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/70573/67752>.
3. Castañeda, A. V. (2016). *Estudio de Prefactibilidad para la construcción de una pequeña central hidroeléctrica ubicada en la cuenca del río Teusaca* (Tesis de maestría). Universidad libre, Colombia.
4. Castro, D. (2017). *Metodología para el dimensionamiento y optimización de pequeñas centrales hidroeléctricas en Guatemala: Evaluación de la Estructura de Financiación de las inversiones con parámetro básico para el estudio de viabilidad* (Tesis de doctorado). Universidad Alfonso X El sabio, Madrid.
5. Cink Hydro-Energy. (2014). *Características técnicas de Turbina de Flujo Cruzado, caja multiplicadora y generador instalada en Mopá*. República Checa: Autor.

6. Ecured. (13 de febrero, 2021). Energía renovable. [Mensaje en un blog]. Recuperado de https://www.ecured.cu/Energ%C3%ADa_renovable.
7. Fernández, F. H., y Duarte, J. E. (diciembre, 2012). Desarrollo de un caudalímetro digital para la medición de caudal en ríos. *Revista de Investigación Desarrollo e Innovación*, 3, 44-51.
8. García, L. (2012). *Teoría de la medición de caudales y volúmenes de agua e instrumental necesario disponible en el mercado*. Madrid, España: ITGE.
9. González, A. (2020). *Medición de variables hídricas asociadas a plantas de generación hidroeléctricas*. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.
10. Hidraes Ingenieros Consultores (2014). *Diseño final de Hidroeléctrica Mopa*. Guatemala: Autor.
11. López, J. (2004). *Manual de conducciones uralita: sistemas de conducciones en infraestructuras, riego y edificación*. Madrid, España: Thomson Paraninfo.
12. Martínez, F., y Fernández, J. F. (2005). Pérdidas de carga en tuberías. Coeficientes de rugosidad. *IV Jornada sobre Tuberías de Hormigón Armado y Postensado, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)*. Simposio llevado a cabo en Madrid, España.

13. Pedroza, E. (2016). *Medición de flujo volumétrico en presas, canales y pozos*. Morelos, México: IMTA. Recuperado de https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/medicion-flujo/files/assets/common/downloads/publication.pdf.
14. Pedroza, E. (2017). *El molinete, importancia, fundamentos y buenas prácticas*. Morelos, México: IMTA. Recuperado de http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/2185/IMTA_613.pdf?sequence=1&isAllowed=y.