



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE LAS
INDISPONIBILIDADES DE PRESAS DE USO HIDROELÉCTRICO Y PROPUESTA DE
MEJORA AL MARCO REGULATORIO DE LAS NORMAS DE SEGURIDAD DE PRESAS DE
LA COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

César Aníbal de León Godínez

Asesorado por el MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque

Guatemala, mayo de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE LAS
INDISPONIBILIDADES DE PRESAS DE USO HIDROELÉCTRICO Y PROPUESTA DE
MEJORA AL MARCO REGULATORIO DE LAS NORMAS DE SEGURIDAD DE PRESAS DE
LA COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CÉSAR ANÍBAL DE LEÓN GODÍNEZ

ASESORADO POR EL MSC. ING. JUAN CARLOS FUENTES MONTEPEQUE

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO INDUSTRIAL

GUATEMALA, MAYO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Roberto Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García
EXAMINADORA	Inga. Priscila Yohana Sandoval Barrios
EXAMINADOR	Ing. Sergio Fernando Pérez Rivera
EXAMINADORA	Inga. Mayra Saadeth Arreaza Martínez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE LAS
INDISPONIBILIDADES DE PRESAS DE USO HIDROELÉCTRICO Y PROPUESTA DE
MEJORA AL MARCO REGULATORIO DE LAS NORMAS DE SEGURIDAD DE PRESAS DE
LA COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 27 de enero de 2020.

César Aníbal de León Godínez

Ref: EEPFI-068-2020
Guatemala, 27 de enero de 2020

Director
Ing. César Ernesto Urquizú Rodas
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial
Presente.

Estimado Ing. Urquizú:

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante **César Aníbal de León Godínez** carné número **200413749**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en Artes en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados.

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

Sin otro particular,

Atentamente,

Ing. Juan C. Fuentes M.
M.Sc. Hidrología
Colegiado No. 2,504

Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Asesor

"Id y Enseñad a Todos"

Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Área
Desarrollo Socio-Ambiental y Energético

Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

EIMI-001-2020

Guatemala, febrero de 2020

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE LAS INDISPONIBILIDADES DE PRESAS DE USO HIDROELÉCTRICO Y PROPUESTA DE MEJORA AL MARCO REGULATORIO DE LAS NORMAS DE SEGURIDAD DE PRESAS DE LA COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA**, presentado por el estudiante universitario César Aníbal de León Godínez, considerando que el protocolo es viable para realizar el Proceso de Graduación procedo con el AVAL, ya que cumple los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. César Ernesto Urquizú Rodas
Director

Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial





DTG. 207E.2020

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE LAS INDISPONIBILIDADES DE PRESAS DE USO HIDROELÉCTRICO Y PROPUESTA DE MEJORA AL MARCO REGULADORIO DE LAS NORMAS DE SEGURIDAD DE PRESAS DE LA COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA**, presentado por el estudiante universitario: **César Aníbal de León Godínez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, mayo de 2020

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por todas las bendiciones derramadas en mi vida y las de mi familia, manifestando que para cada anhelo hay un determinado tiempo, también por ser fortaleza y sabiduría en esos momentos de tribulación.
- Mis padres** Blanca Elizabeth Godínez Orozco y César Aníbal de León Vásquez (q. d. e. p.) por su cariño, consejos, paciencia y apoyo en todo momento; que el logro que hoy alcanzo sea un aliciente a sus esfuerzos.
- Mis hermanos** Juan Daniel, Patricia Elizabeth, Ingrid Lucrecia, Carlos Roberto y María de los Ángeles de León Godínez; por sus deseos y apoyo incondicional.
- Mi hija** Emily Beatriz de León, por ser un motor en mi vida.
- Mi prometida** Daniela Santos, por el cariño, apoyo y comprensión ante todo lo que emprendo.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad San Carlos de Guatemala	Por abrirme las puertas y brindarme la oportunidad de haber optado a una educación superior.
Facultad de Ingeniería	Por proveerme de conocimientos y competencias ingenieriles que espero desarrollar y renovar en el tiempo a través del principio de la mejora continua.
Mis familiares	Por el apoyo brindado y muestras de aprecio a lo largo de mi vida.
Mis amigos y compañeros	Por todos aquellos que me acompañaron y me acompañan en los distintos ámbitos en los que me he desenvuelto, gracias por su estima y confianza.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
3.1. Contexto general	7
3.2. Descripción del problema	7
3.3. Formulación del problema	8
3.3.1. Pregunta central.....	8
3.3.2. Preguntas auxiliares	8
3.3.3. Delimitación del problema	9
4. JUSTIFICACIÓN	11
5. OBJETIVOS	13
5.1. General.....	13
5.2. Específicos	13
6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN	15
7. MARCO TEÓRICO.....	17
7.1. Energía hidroeléctrica	17

7.1.1.	Antecedentes de las hidroeléctricas	18
7.1.2.	Clasificación de las centrales hidroeléctricas...	21
7.1.3.	Proceso de producción de energía hidroeléctrica	22
7.1.4.	Ventajas y desventajas de las centrales hidroeléctricas	24
7.2.	Participación de la energía hidráulica en el mercado mayorista eléctrico guatemalteco	25
7.2.1.	Capacidad instalada del parque de generación de Guatemala	25
7.2.2.	Generalidad de los costos asociados a la generación hidroeléctrica	27
7.2.3.	Participación de las hidroeléctricas en la producción de energía	28
7.2.4.	Potencial hidroeléctrico en Guatemala	30
7.3.	Seguridad de presas de uso hidroeléctrico.....	32
7.3.1.	Presa.....	32
7.3.2.	Hitos acerca de las presas	33
7.3.3.	Tipología de presas	34
7.3.3.1.	Presas de gravedad	34
7.3.3.2.	Presas de materiales sueltos....	37
7.3.4.	Estructuras accesorias	38
7.3.5.	Marco regulatorio de seguridad de presas en Guatemala.....	42
7.3.6.	Consideraciones generales para la gestión de seguridad de presas	44
7.3.6.1.	Aspectos hidrológicos- hidráulicos	46
7.3.6.2.	Aspectos estructurales	47

	7.3.6.3.	Aspectos geológicos- geotécnicos.....	48
	7.3.6.4.	Aspectos de equipamiento, instalaciones, accesos y comunicaciones	49
	7.3.7.	Consideraciones generales de fallas en presas	49
7.4.		Aspectos relevantes en la generación de energía eléctrica en Guatemala	50
	7.4.1.	Oferta de energía.....	50
	7.4.2.	Costos variables de Generación	51
	7.4.3.	Precio <i>spot</i>	51
	7.4.4.	Oferta firme y oferta firme eficiente centrales hidroeléctricas	52
7.5.		Disponibilidad e indisponibilidad de centrales de generación.....	52
	7.5.1.	Coeficiente de disponibilidad.....	53
	7.5.2.	Transacción de desvíos de potencia	53
	7.5.3.	Generación forzada	54
8.		ÍNDICE PROPUESTO.....	55
9.		METODOLOGÍA	59
	9.1.	Características del estudio.....	60
	9.2.	Unidades de análisis.....	61
	9.3.	Variables	61
	9.4.	Fases del estudio.....	62
	9.4.1.	Fase 1: recopilación y ordenamiento	

	de la información	62
9.4.2.	Fase 2: análisis de datos	63
9.4.3.	Fase 3: diseño y propuestas de mejoras a la gestión de seguridad de presas	63
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	65
11.	CRONOGRAMA	67
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	69
13.	REFERENCIAS	71

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Proceso de producción hidroeléctrico.....	24
2.	Potencia efectiva instalada en el SNI	26
3.	Costo variable de generación promedio año 2017	28
4.	Producción de energía por tipo de tecnología año 2017	29
5.	Potencial hidroeléctrico en Guatemala	31
6.	Presa tipo arco	35
7.	Presa tipo gravedad	36
8.	Presa tipo contrafuertes	37
9.	Presa tipo materiales sueltos	38
10.	Esquema general presa y estructuras accesorias	39
11.	Cronograma de actividades	67

TABLAS

I.	Hidroeléctricas relevantes, previo a los años noventas	19
II.	Principales hidroeléctricas en Guatemala.....	20
III.	Presas más antiguas en el mundo	33
IV.	Definición teórica y operativa de variables	61
V.	Recursos e insumos a utilizar.....	69

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
m	Metro
kW	Kilovatio
MW	Megavatio
GW	Gigavatio
kWh	Kilovatio-hora
MWh	Megavatio-hora
GWh	Gigavatio-hora
US\$/día	Dólares al día
US\$MWh	Dólares por megavatio-hora

GLOSARIO

AMM	Administrador del Mercado Mayorista. Ente encargado de la operación técnica-comercial del mercado mayorista en Guatemala.
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica. Órgano técnico del Ministerio de Energía y Minas que regula el subsector eléctrico Guatemalteco.
Embalse	Cuerpo de agua retenido por una o más presas, inclusive sus orillas y bordes y cualquier instalación necesaria para su operación.
Energías renovables	Energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales.
Gran usuario	Consumidor de energía cuya demanda de potencia excede cien kilovatios (kw), o el límite inferior fijado por el Ministerio en el futuro.
LGE	Ley General de Electricidad.

Matriz energética	Una matriz energética es una radiografía de cómo está balanceado el consumo de energía entre distintas fuentes en un periodo de tiempo.
MEM	Ministerio de Energía y Minas. Órgano del Estado responsable de formular y coordinar las políticas, planes de Estado, programas indicativos relativos al subsector eléctrico y aplicar esta ley y su reglamento para dar cumplimiento a sus obligaciones.
Mercado Mayorista	Conjunto de operaciones de compra y venta de bloques de potencia y energía que se efectúan a corto plazo.
O&M	Operación y mantenimiento.
POE	Precio de oportunidad de la energía o precio <i>spot</i> . Costo marginal de corto plazo de la energía en cada hora, o en el período que defina la Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
SNI	Sistema Nacional Interconectado. Toda la infraestructura eléctrica destinada a la prestación del servicio, interconectados o no, dentro del cual se efectúan las diferentes transferencias de energía eléctrica entre diversas regiones del país.

Usuario

Titular o poseedor del bien inmueble que recibe el suministro de energía eléctrica.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación se basa en evaluar aspectos técnico-económicos en cuanto a la generación hidroeléctrica poco explorados, como lo son las indisponibilidad parciales o totales de centrales hidroeléctricas que pudiesen ser provocados por una reducida o nula atención a la gestión de las Normas de Seguridad de presas.

Las Normas en cuestión fueron emitidas en el año 1999 y sufrieron reformas en el año 2016, de acuerdo con Comisión Nacional de Energía Eléctrica (2016), para: “Proveer los fundamentos para regular la seguridad de las presas dedicadas a la generación de energía eléctrica en Guatemala, para garantizar la protección de las personas, sus derechos y bienes” (p.12), en la actualidad no existen datos estadísticos u otro tipo de indicadores que puedan referenciar el cumplimiento y veracidad de dicha normativa tanto para el ente fiscalizador como los sujetos fiscalizados.

A través de la realización de la investigación se desarrollaran instrumentos técnico-administrativos que apoyen a la gestión del cumplimiento de las Normas de Seguridad de Presas para el caso de los Agentes Hidroeléctricos y se aportará un marco referencia optativo para el cual podría propiciar reformas a la normativa en cuestión por parte del ente regulador, las cuales propiciarían mejorar el cumplimiento de las normas en cuestión y agilizar gestiones en pro de centrar esfuerzos en actividades y acciones prioritarias en el que hacer de gestión de seguridad de presas de uso hidroeléctrico.

2. ANTECEDENTES

La energía eléctrica en la actualidad juega un papel relevante en el interactuar de las personas, a través de su utilización se prestan servicios y fabrican productos que consumimos en determinado momento. Para su producción se utilizan distintos tipos de tecnologías siendo unas más amigables que otras respecto al medio ambiente. Las hidroeléctricas o centrales hidráulicas son consideradas pioneras en la producción eléctrica, en concordancia con lo referido por Fundación Solar (2013) “La energía hidráulica se refiere al aprovechamiento de la fuerza que tiene el agua, que se obtiene buscando una caída de agua desde cierta altura a un nivel inferior, la que luego se transforma en energía mecánica (a través de la rotación de un eje), con el uso de una rueda hidráulica o turbina” (pp. 8-9).

De acuerdo con International Renewable Energy Agency (2015) “la energía hidroeléctrica existente es uno de los métodos más rentables para generar electricidad. La mayoría de las plantas se construyeron hace mucho tiempo y la inversión inicial para las presas y la infraestructura hidrogeológica han sido amortizadas por su parte” (p.9). Esto a en cuanto proyectos de por lo menos tienen una longevidad de 20 a 25 años, inicialmente sus inversiones son elevadas pero su alta vida útil que en promedio es de al menos 50 años, las hacen proyectos bastante rentables y viables, en concordancia con International Renewable Energy Agency (2015) “después de esta amortización, los costos restantes tienen que ver con la operación y O&M, y el posible reemplazo de componentes de maquinaria después de varias décadas de operación” (p.9).

La energía eléctrica es trascendente en ciertas actividades y se vuelve prioritario contar con ella, tal es el caso de: salud, alimentación, economía, industria entre otras actividades; es por ello que depender de una sola tecnología para la producción sería insuficiente, se deben tomar en cuenta potenciales contingencias, es por ello que en su normativa aplicable el Administrador del Mercado Mayorista (2000) establece: “la seguridad y el abastecimiento de energía eléctrica del País, tomando en consideración, la coordinación de la operación, el establecimiento de precios de mercado dentro de los requerimientos de calidad de servicio y seguridad” (p.1).

Para poder garantizar la provisión de energía eléctrica, se torna necesario contar principalmente con: las redundancias necesarias, una programación lo más precisa posible y una adecuada gestión de la infraestructura de producción energética. En el caso de las centrales hidroeléctricas en ocasiones los esfuerzos respecto a la seguridad operativa se canalizan a la casa de máquinas y se deja de lado el resto de infraestructura, la cual es relacionada a la presa y estructuras accesorias, En el pasado, las presas se construían con el único fin de suministrar agua o de regar las tierras, Comisión Internacional de Grandes Presas (2007) refiere: “las presas se construyen para responder a objetivos bien precisos, el desarrollo de las civilizaciones ha conllevado el aumento de necesidades para el suministro de agua, regadío, control de avenidas, navegación, calidad del agua, control de sedimentos y energía hidroeléctrica” (p.19).

Organismo Regulador de Seguridad de Presas (ORSEP), (s.f.) refiere que: “La construcción de una presa se ejecuta siguiendo especificaciones técnicas previamente establecidas, donde se determinan, entre otras cosas, los tipos y calidades de los materiales a utilizar, los ensayos de calidad a efectuar, los límites aceptables para ciertos factores y la calidad de las terminaciones” (p.21), lo anterior en cuanto a la etapa previa al primer llenado y puesta en operación de

una determinada presa. Cuando una presa es operada de acuerdo a su finalidad, se debe mantener una constante vigilancia respecto a su comportamiento, es por ello que en concordancia con Organismo Regulador de Seguridad de Presas (ORSEP), (s.f.), se puede inferir que: “Los ingenieros encargados de la inspección de obra son los responsables de supervisar el cumplimiento de esas especificaciones para verificar que tanto los materiales como su colocación respondan a las exigencias del proyecto” (p.21).

Soriano e Ignacio (2008), refieren: “Tradicionalmente, la gestión de la seguridad de presas y embalses implica, por un lado, actividades realizadas de forma sistemática y periódica - como las inspecciones ordinarias o el registro de la auscultación y, en definitiva, el cumplimiento de las Normas de Explotación” (pp.105-106), las normas y entidades fiscalizadoras ayudan en un cierto grado a mejorar el grado de asertividad respecto a una actividad, en Guatemala en materia de gestión de seguridad de presas la CNEE es quien tiene la atribución por establecer la normativa aplicable de seguridad de presas, Comisión Nacional de Energía Eléctrica (2016) establece “las Normas de Seguridad de Presas aplican para las presas con una altura mínima de dos punto cinco metros (2.5 m) y cuya capacidad de almacenaje de agua mínima es de treinta mil metros cúbicos (30,000 m³) y que están conectadas al Sistema Nacional Interconectado” (p.12).

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1. Contexto general

Las centrales hidroeléctricas están compuestas por un conjunto de infraestructura que coadyuva a desarrollar el proceso de generación de energía eléctrica, uno de los principales elementos en que los propietarios y encargados de las centrales hidroeléctricas centran sus esfuerzos en materia de la gestión de mantenimientos y preservación de infraestructura es en la casa de máquinas, recinto en el cual es resguardado el grupo turbina-generator.

3.2. Descripción del problema

De datos que son publicados por el Administrador del Mercado Mayorista en cuanto a planillas de mantenimiento y programaciones de largo plazo, se puede inferir que lo concerniente al mantenimiento de presas y obras de conducción pasa a un segundo plano, situación que a la vez provoca incumplimiento a las Normas de Seguridad de Presas que han sido emitidas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica.

Dicha situación no podría garantizar que el proceso de generación sea efectivo y esté disponible a requerimiento del Administrador del Mercado Mayorista para satisfacer la demanda del suministro al sistema. Por ende los compromisos contractuales de los agentes generadores y la seguridad de las personas se puedan ver comprometidos.

Con el desarrollo del trabajo de tesis se busca crear un marco referencia para fomentar las buenas prácticas de gestión de seguridad de presas de uso hidroeléctrico a través proponer mejoras a las Normas de Seguridad de Presas, también se busca brindar una metodología en apego a normas de operación para determinar los costos por inoperatividad a través el análisis de las indisponibilidades a las que podrían estar afectas las hidroeléctricas.

3.3. Formulación del problema

A continuación, se describen los cuestionamientos al respecto.

3.3.1. Pregunta central

¿Qué erogaciones y costos están asociados a la no generación hidroeléctrica, derivado de la falta de buenas prácticas de seguridad de presas?

3.3.2. Preguntas auxiliares

1. ¿Cuáles son las prácticas o lineamientos en materia de seguridad de presas que los agentes hidráulicos deberían apegarse?
2. ¿Cómo se relacionan los costos de indisponibilidad y los compromisos contractuales de los agentes generadores hidráulicos?
3. ¿Qué tipo de sanciones realiza la CNEE, a los agentes hidráulicos que no cumplen con medidas de seguridad a presas y estructuras accesorias?

3.3.3. Delimitación del problema

Las Normas de Seguridad de Presas, son de aplicabilidad permanente a las centrales hidroeléctricas que tengan una presa de por lo menos 2.5 metros de altura mínima y cuya capacidad de embalse sea de por lo menos 30,000 metros cúbicos. Tomando en cuenta la pregunta central y las preguntas auxiliares del numeral anterior y que el presente trabajo se plantea desde el punto propositivo, se espera que en la praxis los agentes generadores hidroeléctricos y la CNEE evalúen e incorporen en el mediano plazo (dos años) la adopción de los resultados del mismo.

4. JUSTIFICACIÓN

El trabajo está enmarcado en las líneas de investigación: regulación del sector eléctrico, regulación a nivel nacional y economía y finanzas e ingeniería de la confiabilidad y riesgo.

La producción de energía eléctrica en Guatemala, es sustentada y efectuada mediante tecnologías que se complementan entre si gracias a las distintas fuentes de aprovechamiento y combustibles primarios, de las cuales sobresalen en porcentaje de participación: las plantas hidráulicas con un 38.39 % equivalente a 5,190.98 GWh; turbinas de vapor 25.34 % equivalente a 3,382.10 GWh; cogeneradores 20.71 % equivalente a 2,764.58 GWh; el restante 15.56 % de la producción se realiza con tecnologías como: motores reciprocantes, eólica, geotérmica, fotovoltaica, turbinas de gas, importaciones y desviaciones, según el informe estadístico anual 2018, publicado por el Administrador del Mercado Mayorista.

La producción de energía eléctrica en Guatemala es programada con base a un despacho hidrotérmico, esto derivado a que tanto las tecnologías hidráulicas o hidroeléctricas conjuntamente con las plantas de generación térmica, coadyuvan a que dicho despacho sea lo más económico posible, ambas tecnologías tienen un porcentaje importante de participación en la totalidad de generación que se realiza y que abastece tanto a grandes usuarios (consumidores industriales) y pequeños usuarios (consumidores domésticos).

Al tomar en cuenta la relevancia y participación de la generación hidroeléctrica para cubrir la demanda de energía eléctrica del país y que las

Normas de Seguridad de Presas, fomentan la preservación de infraestructura clave en el proceso de producción de energía eléctrica y de la integridad de las personas que se encuentran próximas al área de influencia de las centrales hidroeléctricas. Se torna relevante investigar, inferir y referir mecanismos que propicien una adecuada gestión al respecto y ayuden a los agentes hidráulicos a conceptualizar las pérdidas y sanciones técnico-económicas en las que pudieran incurrir, derivado de no realizar una adecuada gestión en materias de las Normas de Seguridad de Presas.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Desarrollar un marco referencia que cualquier agente generador hidráulico pueda adoptar para poder valorizar tanto técnicamente como económicamente la falta de producción hidroeléctrica por la falta de buenas prácticas en materia de seguridad de presas

5.2. Específicos

1. Investigar, referir y describir aspectos relevantes de la producción hidroeléctrica, como: proceso de generación; infraestructura, prestando especial atención a los componentes que son fiscalizables por las Normas de Seguridad de Presas; participación en la matriz energética; relevancia en el mercado eléctrico guatemalteco entre otros aspectos.
2. Inferir y referir las variables que deben ser consideradas por los agentes generadores hidráulicos en la estimación de los costos por indisponibilidad y como afectan sus compromisos contractuales.
3. Evaluar las Normas de Seguridad de Presas y proponer instrumentos técnico-administrativos, que puedan ser adoptados tanto por los agentes generadores hidráulicos como por el ente regulador para fomentar una mejor praxis de las mismas.

6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN

Con la realización del presente trabajo de investigación se atenderán necesidades de:

- Interpretación y planteamiento de mejoras al marco regulatorio de las Normas de Seguridad de Presas, tanto para el ente fiscalizador como para los participantes del subsector eléctrico que son objeto de fiscalización, lo cual podría ayudar a la consolidación de reglas claras para la aplicación de las normas en cuestión, a través de una posible reforma a las mismas.
- Definición clara de instrumentos de análisis económicos en apego a normativas aplicables, derivado de indisponibilidades producidas por una gestión no adecuada a las presas y estructuras accesorias.

7. MARCO TEÓRICO

En este primer capítulo, se desarrollan las principales nociones de la energía hidroeléctrica o energía hidráulica. Se puntualizan y enfatizan tópicos concernientes a su producción, infraestructura clave para su desarrollo, participación en el subsector eléctrico guatemalteco entre otros aspectos relevantes que se tornan importante conceptualizar, previo al desarrollo concéntrico de la presente tesis.

7.1. Energía hidroeléctrica

Inicialmente se define que la energía eléctrica es producida mediante el conjunto de infraestructura civil y equipamiento hidráulico, mecánico y eléctrico a través del aprovechamiento de un afluente.

Un concepto más elaborado al respecto podría ser lo referido por EPEC Educa (2018) el cual indica: “Es utilizar la energía potencial del agua almacenada y convertirla en energía eléctrica. Esto se realiza a través de un sistema de captación de agua, la cual es conducida a las turbinas. El agua, al pasar por las turbinas a gran velocidad, provoca un movimiento de rotación que finalmente se transforma en energía eléctrica por medio de los generadores” (p.10).

Otros autores definen la energía hidráulica o hidroeléctrica como:

Una central hidroeléctrica de pequeña escala es un conjunto de instalaciones que tienen como objetivo utilizar la energía potencial (asociada a la altura) y cinética (asociada al movimiento) que tiene un río, y

transformarla en energía eléctrica. La potencia de una central hidroeléctrica se mide generalmente en kilovatio (kW), megavatio (MW) y gigavatio (GW) que equivale a mil, un millón y mil millones de vatios, respectivamente. (Fundación Solar, 2013, p.12)

Una noción un poco más elaborada y que complementa lo anteriormente descrito sería:

Conjunto de infraestructura ingenieril que utiliza el afluente de uno o varios ríos para generar energía eléctrica. Su funcionamiento está basado en el salto de masas de agua. El agua que cae de un nivel superior a un nivel inferior, la energía potencial se convierte en gravitatoria, consecuentemente a energía cinética por el traslado del agua que se efectúa mediante las obras de conducción, hasta el grupo turbina-generador produciendo finalmente energía mecánica a eléctrica.

La energía producida es suministrada a la red eléctrica de alta y media tensión o distribución mediante un proceso de transformación de voltajes en una subestación periférica a la casa de máquinas.

7.1.1. Antecedentes de las hidroeléctricas

Aprovechar el agua para la producción de energía data de más de 3,000 años en el pasado, con el surgimiento de las primeras ruedas de madera que se utilizaban en molindas, EPEC Educa (2018) refiere:

Los griegos y los romanos las empleaban para moler granos y para elevar el agua por encima del cauce de los ríos para regadío. En el Medioevo, gigantescas ruedas elevadoras impulsaban martillos de hierro. Desde

mediados del siglo XIX, la energía hídrica se convirtió en un factor decisivo para la creciente industrialización. Cuando, en 1866, Werner von Siemens descubrió el principio dínamo eléctrico sentó las bases para la obtención de energía eléctrica. (p.3)

En Guatemala, la producción hidroeléctrica, se inicia en la década de los ochentas, “al instalarse la primera hidroeléctrica en la finca El Zapote, al norte de la capital. Al año siguiente se forma la Empresa Eléctrica del Sur por empresarios alemanes que instalaron la hidroeléctrica Palín de 732 KW., la cual brindó servicio a los departamentos de Guatemala, Sacatepéquez y Escuintla” (Electricidad Ined Aneño Ency, 2011).

Otras hidroeléctricas que han sido relevantes en desarrollo de energía eléctrica para Guatemala, previo a la promulgación de la Ley General de Electricidad (LGE) son:

Tabla I. Hidroeléctricas relevantes, previo a los años noventas

No.	HIDROELÉCTRICA	INICIO DE OPERACIÓN	ULTIMA CAPACIDAD INSTALADA RECONOCIDA EN MW	SITUACIÓN ACTUAL
1	Santa María	1927	6.88	En operación
2	El Salto	1932	2.5	En operación
3	Río Hondo	1962	2.4	Inoperante
4	Los Esclavos	1966	14.00	En operación
5	Jurún Marinalá	1966	60.00	En operación
6	El Porvenir	1968	2.28	Inoperante
7	Aguacapa	1982	90.00	En operación
8	Chixoy	1983	300.00	En operación

Fuente: elaboración propia, con datos del MEM.

Después de la difusión de la LGE y la desintegración vertical del Mercado Eléctrico de Guatemala, se propició que el sector privado desarrollara las inversiones necesarias para robustecer la cantidad de proyectos hidroeléctricos y otras tecnologías que conforman actualmente el parque de generación.

A marzo del año 2019 el Ministerio de Energía y Minas (MEM) contabiliza 34 hidroeléctricas en operación para un total de 1,419.36 MW de capacidad instalada; 10 en construcción para un total de 206.46 MW de capacidad instalada, 13 que no han iniciado construcción para un total de 387.65 MW de capacidad instalada y 6 en trámite de autorización para un total de 211.66 MW de capacidad instalada, los datos referidos corresponden únicamente a centrales hidroeléctricas con capacidad instalada mayor a 5MW.

Del grupo de centrales hidroeléctricas que actualmente están en operación en Guatemala, destacan:

Tabla II. Principales hidroeléctricas en Guatemala

No.	HIDROELÉCTRICA	ULTIMA CAPACIDAD INSTALADA RECONOCIDA EN MW
1	Chixoy	300.00
2	Renace II (Fase I y II)	186.00
3	Hidro Xacbal	94.00
4	Aguacapa	90.00
5	Proyecto Renace IV	85.00
6	Palo Viejo	85.00
7	Hidro Xacbal Delta	75.00
8	Renace	68.10
9	Jurún Marinalá	60.00
10	Hidroeléctrica El Manantial	52.00

Fuente: elaboración propia, con datos del MEM.

7.1.2. Clasificación de las centrales hidroeléctricas

Una clasificación bastante común y acertada respecto a las hidroeléctricas de acuerdo al área donde se ubican, el tipo de afluente que aprovechan y su capacidad para almacenar agua es:

- Centrales de pasada: el terreno no presenta mucha pendiente o cambio de alturas, regularmente su caudal es constante y casi asegura la producción de energía o realizar la producción de energía en periodos específicos, estas centrales no poseen ninguna capacidad de reservorio o embalse.
- Centrales de embalses: cuentan con una o varias presas que retienen agua de forma natural debido al bloqueo que estas realizan al afluente, en otros casos se construye un embalse artificial en el cual se transfiere el agua que retiene la presa a dicho elemento estructural. En cualquiera de los casos los embalses ya sea natural o artificial, se encuentran a una distancia y altura apropiada de la casa de máquinas donde se encuentran el grupo turbina-generator y la subestación. El embalse permite que se produzca energía la mayor parte del año. Generalmente estas hidroeléctricas requieren mayores inversiones para su construcción. Las centrales con embalse se pueden subdividir en:
 - Centrales a pie de presa: regularmente la casa de máquinas se encuentra anexa o poco distante a la base del pie de la presa, utiliza el agua que es trasladada desde un nivel superior por gravedad hacia el grupo turbina-generator.
 - Centrales por derivación: el agua de uno o varios ríos es desviada mediante una pequeña presa y es transportada mediante obras de

conducción. Después, llegan hasta un punto en el cual el agua es re direccionada a casa de máquinas a una mayor presión.

- Centrales reversibles (bombeo): centrales que son instaladas o utilizan en sitios donde el agua es un recurso finito o escaso, para ello se instala una presa o embalse que almacena agua que es trasladada mediante una obra de conducción (tubería), desde un punto alto a un punto bajo, punto en el cual se encuentra la casa de máquinas y se realiza el proceso de” transformación a energía eléctrica, el agua utilizada es depositada en un segundo embalse y posteriormente mediante un proceso mecánico-eléctrico es devuelta al punto inicial del cual surgió el aprovechamiento.

En Guatemala, por su participación en el parque de generación y Mercado Mayorista, se clasifican:

Según su capacidad de regulación, la capacidad de regulación se refiere a la capacidad del embalse para guardar agua suficiente para generar a plena carga y poder transferirla entre sus periodos comprendidos en el periodo de regulación. Los parámetros anteriores permiten clasificar las centrales hidráulicas en los siguientes tipos: centrales de capacidad anual, centrales de capacidad mensual, centrales de capacidad semanal, centrales de capacidad diaria centrales de filo de agua. (Administrador del Mercado Mayorista, 2000, pp.28-29).

7.1.3. Proceso de producción de energía hidroeléctrica

Este proceso inicia mediante la acumulación de un volumen de agua, el cual se realiza mediante una presa o un embalse, dicha acumulación es considerada como energía potencial, cuando se desea realizar la producción hidroeléctrica

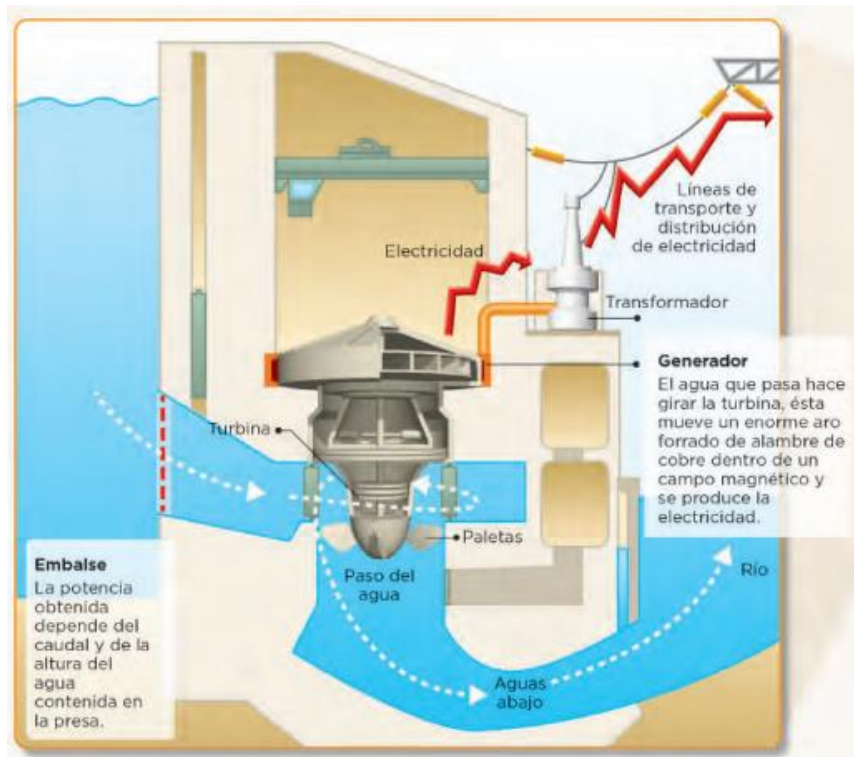
mediante elementos de regulación como compuertas se transfiere el agua a las estructuras de conducción.

Las estructuras de conducción sirven también como elementos de regulación de la velocidad, limpieza o retención de elementos extraños que pudieran llevar el agua y que por ende podrían provocar daños al grupo turbina-generador, dentro de dichos elementos extraños comunes están: basura y lodos. Esto como parte de la seguridad operativa.

Previo que el agua sea admitida y aprovechada por el grupo turbina-generador, comúnmente es precipitada por una tubería de alta presión o forzada, la cual permitirá una mayor aceleración de la misma para su mayor aprovechamiento en la producción hidroeléctrica.

Cuando el agua transforma su movimiento cinético a energía mecánica actuando directamente en los álabes del rodete, este a su vez hace girar el generador produciendo energía eléctrica, la cual es suministrada a una red eléctrica. El agua utilizada para producir electricidad es desfogada nuevamente a los ríos o afluentes.

Figura 1. **Proceso de producción hidroeléctrico**



Fuente: Organismo Regulador de Seguridad de Presas (ORSEP) (s.f.). *Crecer Junto al dique.*

7.1.4. **Ventajas y desventajas de las centrales hidroeléctricas**

Algunas de las principales ventajas de la energía hidroeléctrica, son:

La hidroelectricidad posee buenos cocientes de entrada-salida de energía y niveles de eficiencia de más del 90 por ciento. Esto proporciona una enorme ventaja sobre otros tipos de centrales eléctricas. Además, su generación no contamina el agua ni la atmósfera y la larga vida útil de las instalaciones hidroeléctricas, así

como su bajo costo de mantenimiento, hablan claramente en favor de generar electricidad a partir del agua. (EPEC Educa, 2018, p.5)

Por otro lado, también hay que considerar las desventajas de la energía hidroeléctrica, dentro de las cuales sobresalen:

Necesita mucha agua y una gran superficie para poder construir los embalses, presas y centrales, lo cual cuesta mucho dinero y tiempo. Por este motivo no suele ser competitiva en lugares donde abundan el petróleo o el carbón. Además, si no se realizan estudios profundos los embalses pueden inundar extensas regiones, destruir hábitats de la vida silvestre, desplazar pobladores y disminuir la fertilización natural de los terrenos agrícolas situados agua abajo de la presa. (EPEC Educa, 2018, p.5)

7.2. Participación de la energía hidráulica en el mercado mayorista eléctrico guatemalteco

Desde el surgimiento de la energía eléctrica en Guatemala, las hidroeléctricas, han jugado un importante papel, es por ello que en el desarrollo del presente apartado se enfatizaran datos al respecto.

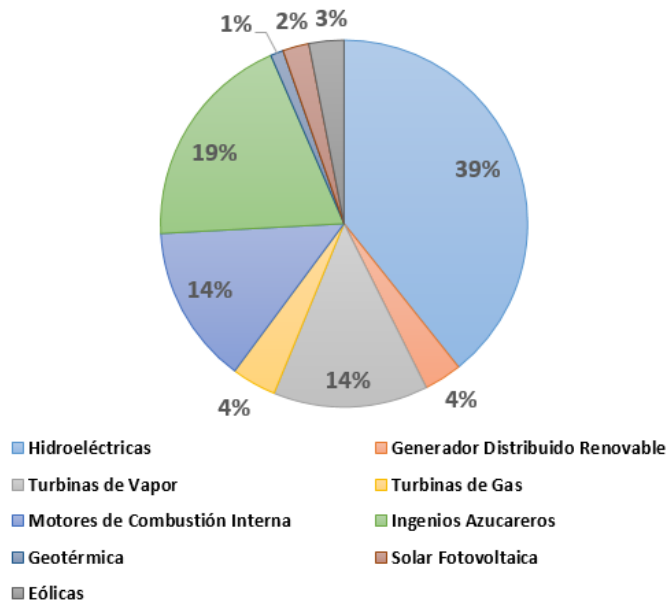
7.2.1. Capacidad instalada del parque de generación de Guatemala

Según Administrado del Mercado Mayorista (2018) durante el año 2018: “se incorporaron 93.347 MW de generación a la operación del Mercado Mayorista (capacidad instalada efectiva), por Oxec II (57.947 MW), Hidroeléctrica Cholivá (0.700 MW), Mini Hidroeléctrica Hidroxocobil (1.200 MW), Hidroeléctrica Hidrosán I (2.000 MW), Las Cumbres (31.500 MW)” (p.1).

La potencia instalada de centrales hidroeléctricas en Guatemala, a finales del año 2018, se incrementó a 1,356.31 MW, dicha situación se esquematiza en la figura siguiente.

Figura 2. **Potencia efectiva instalada en el SNI**

Plantas Generadoras	MW	%
Hidroeléctricas	1,356.31	39.28
Generador Distribuido Renovable	114.72	3.32
Turbinas de Vapor	470.78	13.63
Turbinas de Gas	135.81	3.93
Motores de Combustión Interna	482.70	13.98
Ingenios Azucareros	667.22	19.32
Geotérmica	39.28	1.14
Solar Fotovoltaica	80.00	2.32
Eólicas	106.50	3.08
Total	3,453.32	100.00



Fuente: elaboración propia, con datos del AMM.

7.2.2. Generalidad de los costos asociados a la generación hidroeléctrica

En concordancia con la International Renewable Energy Agency (2015) “la energía hidroeléctrica existente es uno de los métodos más rentables para generar electricidad. La mayoría de las plantas se construyeron hace mucho tiempo y la inversión inicial para las presas y la infraestructura hidrogeológica han sido amortizadas por su parte” (p.9).

Después de dicha amortización, los costos restantes tienen que ver con la O&M, es importante recordar que en promedio la vida útil de una hidroeléctrica es de 50 años, sin costos de reposición sustanciales.

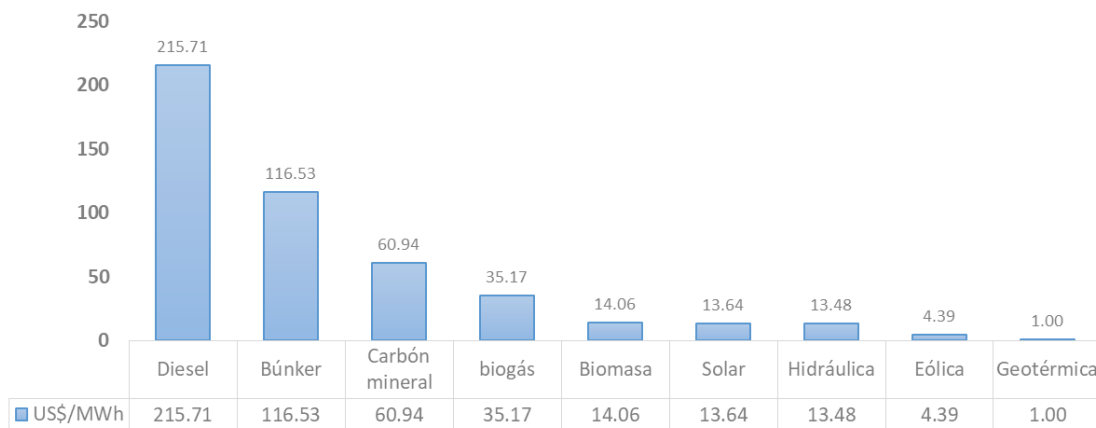
Respecto a la fuente de combustibles para la generación de energía eléctrica International Renewable Energy Agency (2012) refiere: “La naturaleza intensiva en capital de la mayoría de las energías renovables. Tecnologías de generación y el hecho de que los costos de combustible son bajo, o con frecuencia cero” (p.3).

Para el caso específico de Guatemala, los bloques de energía que se definan durante la realización de la programación semanal, el Administrador del Mercado Mayorista (2000), estipula: “se hará competir las distintas ofertas hidráulicas con la oferta térmica y la oferta de generación con recursos renovables no hidráulicos, según los costos variables de generación correspondientes” (p.35).

El mercado eléctrico mayorista de Guatemala, se considera un mercado de costos, el cual trabaja y opera bajo un despacho económico con base a los costos variables declarados por las centrales de generación.

En la tabla inferior se puede apreciar que complementariamente a lo referido por la International Renewable Energy Agency, las centrales hidráulicas presentan una ventaja competitiva y favorecedora a la demanda de energía:

Figura 3. Costo variable de generación promedio año 2017



Fuente: elaboración propia, con datos del MEM.

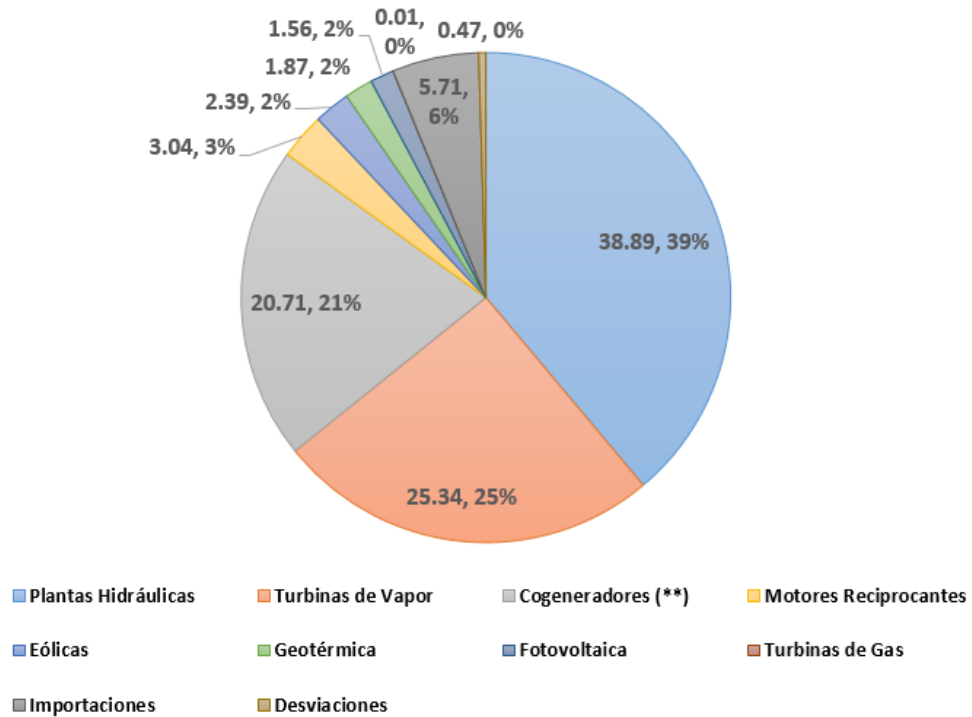
7.2.3. Participación de las hidroeléctricas en la producción de energía

El Administrado del Mercado Mayorista (2018), refirió que durante el año 2018, en Guatemala: “La producción total de energía de 13,348.12 GWh, de los cuales 12,522.39 GWh fueron generados localmente y 825.73 GWh corresponde a energía importada del Mercado Eléctrico Regional y de México” (p.1).

Figura 4. Producción de energía por tipo de tecnología año 2017

Plantas Generadoras	MW	%
Plantas Hidráulicas	5,190.98	38.89
Turbinas de Vapor	3,382.10	25.34
Cogeneradores (**)	2,764.58	20.71
Motores Reciprocantes	405.30	3.04
Eólicas	319.50	2.39
Geotérmica	249.75	1.87
Fotovoltaica	208.31	1.56
Turbinas de Gas	1.86	0.01
Importaciones	762.80	5.71
Desviaciones	62.93	0.47
Total	13,348.11	100.00

**Turbinas de vapor



Fuente: elaboración propia, con datos del AMM.

De lo referido anteriormente se puede inferir que las centrales hidráulicas tiene un gran porcentaje de participación en el Parque de Generación de Energía de Guatemala, misma que se utiliza para abastecer la demanda del Sistema Nacional Interconectado, la cual está compuesta tanto por demanda industrial (grandes usuarios) como por la demanda residencial (usuarios regulados).

7.2.4. Potencial hidroeléctrico en Guatemala

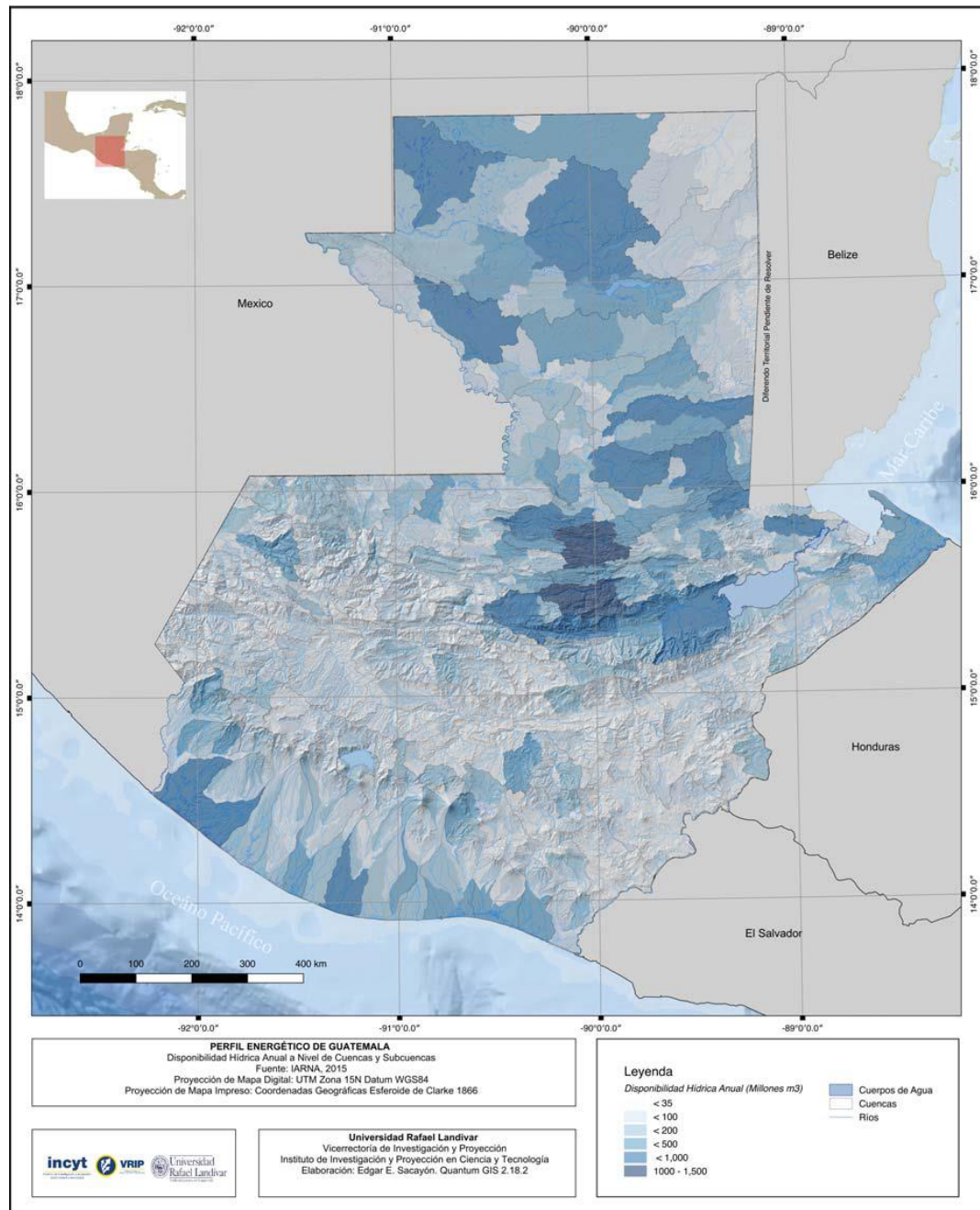
El Ministerio de Energía y Minas (2018) refiere: “Existiendo un potencial aprovechable de 6,000 MW de energía hidroeléctrica, a la fecha solamente se utiliza un 23.1 %” (p.2), por otro lado:

La disponibilidad hídrica de cuencas y subcuencas, usando el modelo Weap desarrollado por el Iarna. Con base en esto, se estima que el potencial hidroeléctrico de Guatemala es de 6,000 MW. El AMM reporta para el 2016 un total de 1,248.21 MW de potencia de placa instalada; lo cual significa que actualmente se aprovecha el 25 % del potencial hidroeléctrico. (Universidad Rafael Landívar, 2018, p.124)

Por otra parte Fundación Solar (2013) indica: “se estima que la potencia para generación de energía a través de fuentes hidráulicas es de 5,000 MW, de los cuales solamente se aprovecha el 17 % (853 MW)” (p.7).

Como se puede apreciar en el tiempo, se ha tratado de estimar de mejor manera lo concerniente al potencial hidroeléctrico guatemalteco, lo referido tanto por la Universidad Rafael Landívar como por el MEM, muestran más alineación. En la siguiente imagen se presenta un mapa representativo al respecto.

Figura 5. **Potencial hidroeléctrico en Guatemala**



Fuente: Universidad Rafael Landívar (2018). *Perfil energético de Guatemala. Bases para el entendimiento del estado actual y tendencias de la energía.*

7.3. Seguridad de presas de uso hidroeléctrico

A continuación se refieren los elementos más relevantes considerados al respecto.

7.3.1. Presa

Una presa puede definirse como:

Una barrera o una estructura colocada cruzando un curso de agua o de un río para retener el agua y así controlar el caudal. Las presas varían de tamaño, pudiendo ser un pequeño terraplén de tierra, a menudo para el uso de una granja, y otras pueden llegar a ser altas estructuras macizas de hormigón que sirven generalmente para el abastecimiento de agua, la energía hidroeléctrica y el riego. (Comisión Internacional de Grandes Presas, 2007, p.17).

En un ámbito más tropicalizado para el caso de Guatemala, la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (2016), una presa es considerada como: “Barrera artificial emplazada a través del río para la retención o derivación del agua. Comprende el muro, vertedero/s, descargador de fondo, compuertas, sus respectivos mecanismos de accionamiento y todos los otros bienes complementarios y auxiliares de éstos” (p.10).

De lo referido anteriormente por el ICOLD y la CNEE, se puede inferir que una presa para uso hidroeléctrico es: una estructura diseñada y construida para bloquear el flujo natural de uno o más ríos con la finalidad de constituir una masa de agua (embalse), que será aprovechada para un uso específico, para el presente estudio siendo de interés la producción de energía hidroeléctrica.

7.3.2. Hitos acerca de las presas

Históricamente las presas han jugado un papel importante para el abastecimiento de agua a la cual se le han dado múltiples usos, los cuales a su vez han contribuido en gran medida al desarrollo de comunidades, la Comisión Internacional de Grandes Presas (2007), indica: “Recientes descubrimientos arqueológicos nos muestran que las simples presas de tierra y las redes de canales se remontan a 2000 años Antes de Cristo. Proporcionaban a la población la fuente fiable de agua que necesitaban para poder vivir” (p.18).

Los principales usos de dichas presas han sido: el riego para la agricultura en épocas de estiaje o sequía, usos domésticos, consumo humano entre otros, en algunos casos puntuales existen presas cuya longevidad ha superado su tiempo de vida útil, tal es el caso de:

Tabla III. Presas más antiguas en el mundo

No.	PRESA / UBICACIÓN	CAPACIDAD DE EMBALSE	ALTURA	INICIO DE OPERACIÓN
1	Quatinah Barrage / Lago Homs, Siria	90 hm ³	7 m.	284 AD
2	Proserpina / España	4 hm ³	21 m.	Siglo II a.C
3	Cornalvo / España	-	24 m.	Siglo II a.C
4	Kaerumataike / Japón	-	17 m.	162 AD.
5	Kallanai / Grand Anicut, India	-	20 m.	Siglo XNXXnd
6	Sayamaike, Japón	18.5 hm ³	7 m.	Siglo X
7	Manoike Dam, Japón	15.4 hm ³	-	1959 (ultima adaptación)
8	Sadd-e Kobar Dam, Irán	-	10 m.	Siglo X dC.
9	Tonnur Kere / Moti Talab, India	-	12 m.	Siglo XNXX
10	Almansa, España	3 hm ³	25 m.	1,384

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de <https://es.ripleybelieves.com/world-s-oldest-dams-still-in-operation-5714>.

7.3.3. Tipología de presas

Las presas según su forma de resistencia a los empujes y materiales de construcción se clasifican en:

- Presas de hormigón
 - Arco
 - Gravedad
 - Contrafuerte
- Presas de materiales sueltos

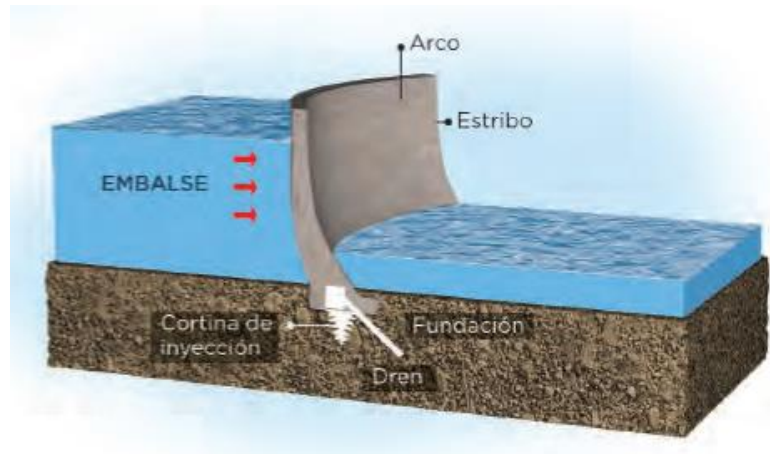
Esta clasificación es reconocida por entidades internacionales expertas en la materia, como: el Comité Nacional Español de Grandes Presas (SPANCOLD), la Comisión Internacional de Grandes Represas (AICOLD) y el Organismo Regulador de Seguridad de Presas (ORSEP), entre otros.

7.3.3.1. Presas de gravedad

Son obras ingenieriles, diseñadas y construidas para soportar fuerzas de empuje en correspondencia al entorno donde son situadas, generalmente áreas no muy estrechas, permite el trasvase de excedentes de agua a mediante su mismo cuerpo.

- Presas de arco: este tipo de “presas de hormigón aprovechan el efecto arco para concentrar el empuje del agua sobre su base de apoyo y en los apoyos laterales. Tienen la ventaja de ser muy esbeltas, lo que supone poco volumen de material. Sin embargo, exigen la presencia de roca de alta resistencia tanto en la base de apoyo como en los apoyos laterales. (Organismo Regulador de Seguridad de Presas, (ORSEP), s.f., p.16).

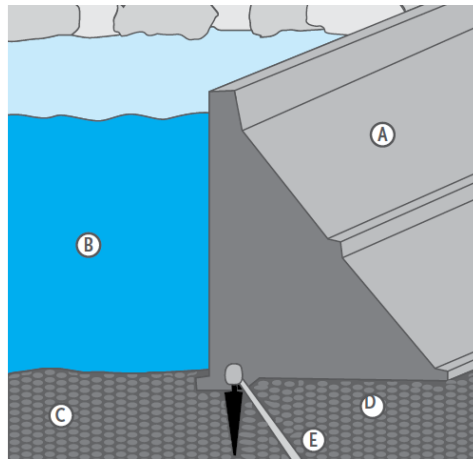
Figura 6. **Presa tipo arco**



Fuente: Organismo Regulador de Seguridad de Presas (ORSEP), (s.f.). *Crecer junto al dique.*

- Presas de gravedad: Organismo Regulador de Seguridad de Presas (ORSEP), (s.f.) refiere: “son obras de hormigón que resisten el empuje del agua gracias a su considerable peso. La estabilidad al vuelco se consigue ensanchando la base” (p.16).

Figura 7. Presa tipo gravedad

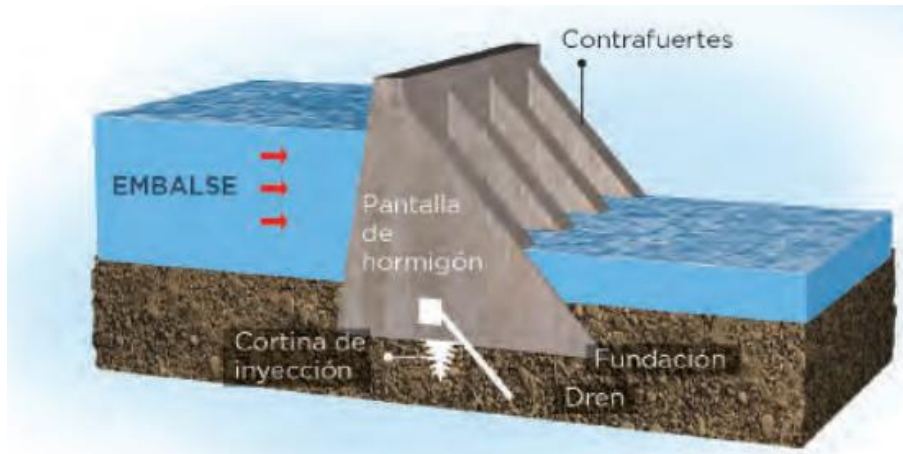


- A) Presa de gravedad.
- B) Embalse.
- C) Cortina de inyección.
- D) Roca de fundación.
- E) Dren.

Fuente: Organismo Regulador de Seguridad de Presas –ORSEP (2010). *Más de 10 años fiscalizando la seguridad estructural y operativa de las presas.*

- Presas de contrafuertes: Organismo Regulador de Seguridad de Presas (ORSEP), (s.f.) indica: “son obras de hormigón. Los contrafuertes son las estructuras que resisten el empuje del agua. La impermeabilidad se consigue mediante una pantalla de hormigón sostenida por los contrafuertes” (p.16).

Figura 8. **Presas tipo contrafuertes**



Fuente: Organismo Regulador de Seguridad de Presas –ORSEP (s.f.). *Crecer junto al dique.*

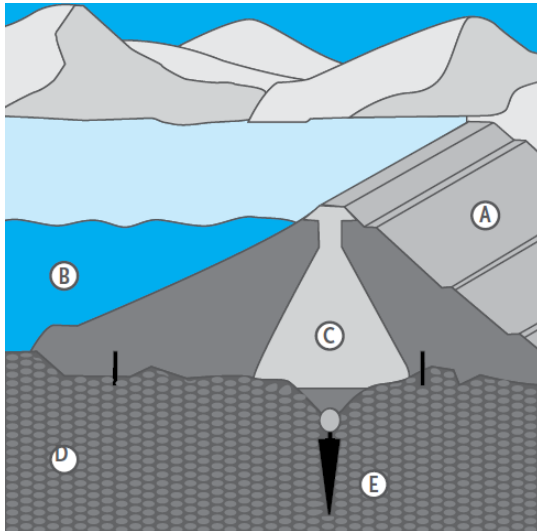
7.3.3.2. **Presas de materiales sueltos**

Este tipo de presas, son:

Son grandes terraplenes compuestos por piedras, gravas, arenas, limos y arcillas, compactados hasta alcanzar una adecuada consistencia para brindar la impermeabilidad y la solidez necesarias para resistir el empuje del agua. Se utiliza un núcleo de arcilla compactada como barrera impermeable o una pantalla de hormigón. (Organismo Regulador de Seguridad de Presas (ORSEP), s.f., p.16)

Estas presas son construidas en áreas cerradas o encañonadas, para el recubrimiento de su núcleo usualmente se utiliza la misma roca que es extraída del cañón o montaña donde estas presas se sitúan, a diferencia de las presas de hormigón estas no deben ser trasvasadas por el agua de su parte posterior a la anterior.

Figura 9. **Presas tipo materiales sueltos**



- A) Presa de materiales sueltos.
- B) Embalse.
- C) Núcleo impermeable.
- D) Roca de fundación.
- E) Cortina de inyección.

Fuente: Organismo Regulador de Seguridad de Presas (ORSEP), (2010). *Más de 10 años fiscalizando la seguridad estructural y operativa de las presas.*

7.3.4. **Estructuras accesorias**

Para el caso de utilización hidroeléctrica:

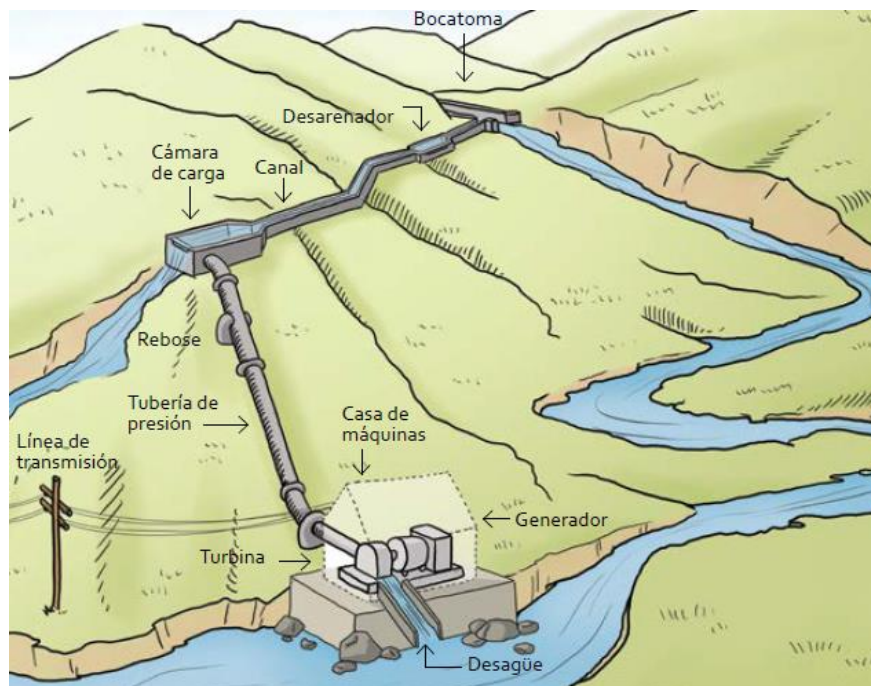
Son las obras, estructuras y equipos, diferentes a la misma presa. Incluyen, pero no están limitadas a, reservorio; obras de toma-azudes derivadores-; vertederos; canales de conducción y derivación; túneles; descargador de fondo; maras de carga; chimeneas de equilibrios; tuberías de alta y baja presión; cámaras desarenadoras; equipamiento mecánico e hidromecánico. (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2016, pág. 8).

Una forma integral de interpretar lo concerniente a dichos componentes o estructuras anexas a una presas de uso hidroeléctrico sería: es toda aquella

infraestructura asociada al proceso de generación hidroeléctrico exceptuando la presa, casa de máquinas y su subestación.

En la imagen inferior se realiza una esquematización de dicha consideración.

Figura 10. **Esquema general presa y estructuras accesorias**



Fuente: Fundación Solar (2013). *Centrales hidroeléctricas de pequeña escala*.

A continuación se refieren algunos de los componentes más comunes asociados a una central hidráulica:

- Bocatoma: generalmente es una estructura de concreto, la cual esta provista de una reja, mediante la cual el agua es admitida para el inicio del proceso de generación hidroeléctrica.

- Sistemas de comunicaciones: conjunto de dispositivos que son utilizados para dar instrucciones o referencias respecto a las maniobras a realizar en la presa, usualmente son radios con una determinada frecuencia (canal de comunicación), o dispositivos telefónicos móviles.
- Puente grúa: equipo mecánico o mecánico eléctrico que se utiliza generalmente para efectuar mantenimientos, su principal función es el transporte de cargas de gran magnitud a lo largo, ancho y diferentes alturas de la sala de mando de una presa, según el tamaño de la misma.
- Sistema limpiarregas: equipos mecánicos-eléctricos, que constan de un brazo y peine, los cuales conjuntamente cumplen con la función de retirar los residuos sólidos orgánicos e inorgánicos que llegan a bocatoma, con la finalidad que no ingresen al resto de la infraestructura de la hidroeléctrica.
- Grúa de limpieza: de similares características y funciones que el sistema limpiarregas, estos equipos retiraran sólidos orgánicos e inorgánicos cuyo tamaño sea de gran magnitud.
- Canal de aducción: estructura hidráulica, que se encarga de trasladar el flujo del agua ingresado a través de bocatoma hacia las estructuras desarenadoras, según su diseño pueden variar en canales abiertos o cerrados.
- Desarenador: componente de concreto, que generalmente posee forma trapezoidal, cuenta con compuertas de admisión en ambos extremos y de purga para poder evacuar los sedimentos que son acumulados en su propio fondo. Estos componentes también se encuentran provistos generalmente de barras desestabilizadoras, las cuales reducen la inercia del agua.
- Canal de conducción: al igual que el canal de aducción, este componente traslada el agua que ha sido trasladada desde los desarenadores con el

mínimo posible de sedimentos hacia las estructuras restantes de una hidroeléctrica.

- Chimenea de equilibrio: componente que es utilizado para liberar sobrepresiones en el sistema de generación, derivado de crecidas súbitas en los aportes de caudal, por lo general están provistas por válvulas y compuertas.
- Cámaras de carga: estructuras de hormigón que cuentan con compuertas de admisión en ambos extremos, se utilizan como un último elemento regularte de velocidad del flujo de agua previo a que dicha agua sea aprovechada por el grupo turbina-generador.
- Sistema de compuertas: elementos mecánicos o mecánicos-eléctricos cuya principal función es la regulación de la cantidad de flujo de agua que se utiliza en la generación hidroeléctrica y por ende las compuertas deben ser instaladas en las obras de conducción. Según su uso y diseño se pueden clasificar en compuertas: planas, ataguías, radiales, basculantes, vagón entre otros tipos de compuertas. Según el tipo de tecnología que se utiliza para realizar las maniobras de apertura y cierre, también se pueden clasificar en: manuales o automatizadas.
- Tubería forzada o de alta presión: elementos metal-mecánicos de forma tubular que cuentan con una determinada inclinación, para poder precipitar con mayor fuerza la inercia del agua a trasladar a casa de máquinas, los espesores de estos elementos varían según su diseño y son recubiertas con resinas especiales, como protección ante las inclemencias del entorno natural donde han sido situadas.
- Plantas de emergencia o sistema auxiliar de energización: máquina mecánica-eléctrica cuya función es proveer energía eléctrica a los equipos de una presa, dentro de estos se puede mencionar: sistemas de comunicación, limpiarregas, grúas, puentes grúas, sistemas de compuertas, bancos de baterías entre otros, equipos útiles para brindar

continuidad en la operación de una presa de uso hidroeléctrico. Su arranque por lo general se efectúa a través de combustión de diésel o bunker.

- Instrumentación: conjunto de equipos o aparatos que ayudan a monitorear aspectos específicos de una presa, su entorno o de las estructuras de conducción, a instalación de estos equipos aumentan los niveles de la gestión de seguridad de presas, los equipos más comunes pueden ser: estaciones meteorológicas, equipo de medición hidrológica, piezómetros, estaciones totales, sismógrafos, caudalímetros, medidores de expansión de juntas, entre otros instrumentos de auscultación.

7.3.5. Marco regulatorio de seguridad de presas en Guatemala

Este tiene sus orígenes con la desintegración vertical del mercado eléctrico guatemalteco, la creación de la LGE y su reglamento.

Congreso de la República de Guatemala (1996) establece: “Se crea la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, en adelante la Comisión, como un órgano técnico del Ministerio. La Comisión tendrá independencia funcional para el ejercicio de sus atribuciones y de las siguientes funciones” (p.2).

Complementariamente, también Congreso de la República de Guatemala, (1996), indica: “emitir las normas técnicas relativas al subsector eléctrico y fiscalizar su cumplimiento en congruencia con prácticas internacionales aceptadas” (p.2).

En concordancia con lo referido anteriormente:

Para garantizar la protección de las personas, sus derechos y bienes, la Comisión elaborará las Normas de Seguridad de Presas, las cuales incluirán todos los aspectos de diseño, auscultación, operación de presas, así como las medidas de seguridad operativa y planes de emergencia que resulten necesarias para cumplir estos objetivos. (Congreso de la República de Guatemala, 1997, p.25).

En el año 1999, la CNEE emite la resolución CNEE-29-99, la cual contenía la primer versión de las NSP, a finales del año 2016, la CNEE emite la resolución CNEE-283-2016, la cual contiene la segunda versión de las NSP; con dicha reformulación es derogada la resolución CNEE-29-99.

La resolución CNEE-283-2016 se vuelve más indicativa y orientativa respecto al que hacer en materia de la gestión de seguridad de presas, respecto a la primer versión de las NSP. En dicha resolución se puntualiza la formulación de lo que es considerado un plan de seguridad de presas y los elementos que darán soporte al mismo.

Sin embargo, en el quehacer de seguridad de presas como en todo sistema, la mejora continua debe estar presente y debe ser parte integral en las gestiones y prácticas que disminuyan la probabilidad de riesgo y fallo de las presas de uso hidroeléctrico.

7.3.6. Consideraciones generales para la gestión de seguridad de presas

La gestión de seguridad de presas, debe tratar de realizarse de forma integral respecto a la vida útil de las misma, según Soriano e Ignacio (2008) “Un determinado modo de fallo queda descrito cuando se estipula el mecanismo concreto de rotura y los agentes o causas que lo provocan” (p.92).

Al tomar en cuenta que la probabilidad de fallo de las presas es mayor en las fases de primer llenado y fin de su vida útil, es necesario llevar un adecuado plan de seguridad de presas con base en la vigilancia y monitoreo de permanente, es por ello que:

El Responsable de la Presa debe realizar las siguientes actividades: a) Elaborar un programa de seguridad, que incluya: Inspecciones de Rutina; Inspecciones Intermedias; Inspecciones Especiales; Inspecciones Extraordinarias; Examen de Seguridad de la Presa y Estructuras Accesorias (ESPEA); Manual de Operación, Mantenimiento y Vigilancia (MOMV); y Plan de Preparación ante Emergencias (PPE). (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2016, p.16).

A continuación se amplían aspectos relacionados con los componentes del plan de seguridad de presa:

- Inspecciones de rutina: son observaciones in situ, a lo largo de toda el área de influencia donde se encuentra situada una presa de uso hidroeléctrico, estas inspecciones deben realizarse con una frecuencia determinada, tratado de propiciar que las condiciones de inspección no varíen demasiado entre inspecciones.

- Inspecciones intermedias: normativamente en Guatemala son dos inspecciones semestrales de mayor profundidad que deberán ser realizadas por un grupo ingenieril multidisciplinario.
- Inspecciones extraordinarias: este tipo de evaluaciones se realizan ante eventos emergentes súbitos, los cuales tienen cierto grado de potencial riesgo a la presa o a las personas.
- ESPEA: en términos generales, es una evaluación que debe ser realizada por profesionales de la ingeniería que no pertenezcan al personal de la central hidroeléctrica, lo anterior con la finalidad que los resultados sean objetivos y brinden un panorama del desempeño de las inspecciones realizadas por el personal que si forma parte del proyecto hidroeléctrico, al igual que en el caso de las inspecciones intermedias debe ser realizado por un grupo multidisciplinario ingenieril.
- MOMV: medularmente es un documento que contiene toda la información técnica concerniente a la infraestructura de la presa y que está relacionada con las medidas de preservación de la misma.
- PPE: documento requerido con carácter de obligatoriedad para todo aquel que administra u opera una presa de uso hidroeléctrico, en el contenido debe figurar las contingencias relacionadas a eventos súbitos tanto para el manejo de la infraestructura asociada a la presa como posibles medidas de recuperación luego de haberse presentado dichos eventos.

Lo anteriormente descrito con la finalidad de controlar y disminuir los potenciales riesgos asociados a la actividad de las presas, la integridad de las personas tanto de las que operan en el área de influencia de las plantas de generación hidroeléctrica como terceros que se sitúan en las periferias de los mismos, otro factor a considerar debe ser los desabastecimientos o racionamientos de energía que se deriven de eventos emergentes.

De acuerdo con Bueno (2007) “La vulnerabilidad como factor de riesgo interno del sistema expuesto a una amenaza de origen natural, tecnológico o humano debe ser considerada cada vez más en obras constructivas con el objetivo de evitar o minimizar los daños para personas, bienes, servicios y el medioambiente causados” (p.7).

Para el caso de las presas y la infraestructura asociada a las mismas se deberán considerar los aspectos de distintas disciplinas de la ingeniería como: hidrología, geología, obra gris, mecánica, eléctrica, hidráulica, geotécnica entre otras.

7.3.6.1. Aspectos hidrológicos-hidráulicos

Estos aspectos contemplan:

La evaluación de la seguridad hidrológica, entendida como la seguridad de una presa frente a episodios de avenida, no puede desligarse de las denominadas seguridad hidráulica y estructural dado que, los niveles de lámina de agua a partir de los cuales se analiza la estabilidad de la presa son consecuencia de: Las avenidas consideradas, La capacidad de desagüe, La fiabilidad de operación de válvulas y compuertas, Los resguardos establecidos, La estrategia de laminación adoptada. (Soriano y Ignacio, 2008, p.100).

Predecir con exactitud el comportamiento natural de uno o varios ríos, los fenómenos climáticos que influyen en los caudales de aporte a los mismos es difícil, sin embargo se torna importante su análisis para tratar de predecir comportamientos y tratar de definir mecanismos de actuar ante potenciales riesgos como.

El colapso de una presa que no ha recibido un mantenimiento adecuado en su obra gris o en sus estructuras accesorias, puede ser provocado por una crecida la cual provocaría una mayor fuerza de empuje al cuerpo de la presa y por ende a la inundación de zonas adyacentes provocando numerosos daños.

Es por ello que todos aquellos instrumentos de medición y alertas tempranas juegan un papel importante en la gestión preventiva de seguridad de presas.

7.3.6.2. Aspectos estructurales

En más de un 70 % un proyecto hidroeléctrico está compuesto por infraestructura civil y/u obras grises, es por ello que los datos estructurales de mayor relevancia que deben ser revisados a partir de la información contenida en el Archivo Técnico son:

- Propiedades asumidas para los materiales, cimentación y estribos.
- Situaciones de carga previstas en proyecto.
- Métodos de análisis que se emplearon en su momento.
- Datos de auscultación del comportamiento (medidores de filtraciones, piezómetros, péndulos, extensómetros, termómetros, entre otros)

Las inspecciones presenciales en todas las estructuras civiles serán de vital importancia y el apoyo en la tecnología coadyuvaran a detectar potenciales fallas en dichos elementos como: fisuras, grietas, disgregaciones de concreto, deformaciones de hormigón, entre otros.

El comportamiento estructural debe ser documentado y resguardado adecuadamente, esto con la finalidad de poder generar un histórico de aquellos aspectos que ameriten un seguimiento y tratamiento especial.

7.3.6.3. Aspectos geológicos-geotécnicos

En general las presas de uso hidroeléctrico están situadas en áreas encañonadas, de topografías irregulares y zonas naturales que en el tiempo pueden ser cambiantes, las estructuras accesorias no son la excepción, estas también pueden estar instaladas en entornos parecidos es por ello que resulta necesario realizar con carácter general y previo, una evaluación del Archivo Técnico de la Presa en lo relativos a los siguientes aspectos:

- Estudios geológicos geotécnicos del proyecto.
- Cartografía geológica de las excavaciones.
- Ensayos de comprobación durante la construcción.
- Descripción de los tratamientos del cimiento.
- Documentación geológico-geotécnica de posibles modificaciones del proyecto.
- Comportamiento del cimiento durante la puesta en carga.
- Reconocimientos del terreno post-construcción.

Desde un punto de vista complementario a las inspecciones presenciales, el análisis del entorno en las cuales están situadas las presas y estructuras accesorias es importante en busca de potenciales cambios que podrían ser tomados como potenciales riesgos como: deslizamientos, socavaciones, tubificaciones, erosiones, asentamientos, entre otros aspectos.

Para los cambios o potenciales riesgos geológicos-geotécnicos, se deberá buscar una medida mitigatoria adecuada.

7.3.6.4. Aspectos de equipamiento, instalaciones, accesos y comunicaciones

Los equipos electromecánicos asociados a las presas y estructuras accesorias no pueden ser excepción a la gestión de seguridad de presas, esto debido a que la falta de certeza en el buen funcionamiento de los mismos puede provocar daños a otros componentes.

Los sistemas de limpieza mecánicos de presa, compuertas, tuberías y equipos especiales como plantas de emergencia y sistemas de comunicación deben ser puestos a prueba constantemente y debe existir un registro de sus intervenciones de mantenimiento al igual que los respectivos procedimientos o instructivos de operación.

7.3.7. Consideraciones generales de fallas en presas

De acuerdo con que “El desbordamiento de una presa es a menudo un precursor de la falla de la presa. El desbordamiento puede deberse a un diseño inadecuado del vertedero, el bloqueo de escombros de los vertederos o el asentamiento de la cresta de la presa” (Comisión Internacional de Grandes Presas, s.f.).

En otra arista, también se conociera que existen factores naturales que deben ser considerados y que en el mediano o largo plazo atentan contra la integridad de las presas y estructuras accesorias como: movimientos verticales, erosiones, agrietamientos, filtraciones, excesivo crecimiento de vegetación; que

de no ser atendidos de forma integral de manera temprana podrían provocar el cese parcial o total de operaciones de una hidroeléctrica.

También se refiere: “Las otras causas de fallas en la presa incluyen la falla estructural de los materiales utilizados en la construcción de la presa y el mantenimiento inadecuado” (Comisión Internacional de Grandes Presas, s.f.), siendo este un tópico importante debido a que no se puede intentar homologar procesos y procedimientos constructivos de edificaciones rurales a este tipo de obras.

7.4. Aspectos relevantes en la generación de energía eléctrica en Guatemala

Estos están relacionados a las Normas Comerciales del AMM, en cumplimiento y apego al Mercado Mayorista guatemalteco.

7.4.1. Oferta de energía

El concepto normado, indica:

Cada unidad generadora de los Participantes Productores a la máxima potencia neta – descontados sus consumos internos - capaz de producir, en función de sus características técnicas, su Potencia Máxima y disponibilidad, teniendo en cuenta las restricciones propias de la central o de su sistema de transmisión asociado. La suma de la Oferta Firme de todas las unidades generadoras de un Participante Productor se denomina Oferta Firme Total (OFT). (Administrador del Mercado Mayorista, 2001, p.1).

7.4.2. Costos variables de generación

Estos costos están asociados al combustible, la operación y al mantenimiento, la metodología de cálculo de costos variables de generación en apego a lo establecido por el AMM:

“No podrá ser modificada durante el año y será función de parámetros que afectan los costos de producción. La metodología declarada deberá ser expresada como una fórmula y deberá incluir todas las explicaciones correspondientes, incluyendo las condiciones en las que pueden variar los parámetros distintos al costo de combustible, expresados en la fórmula de cálculo declarada en la metodología, para que el AMM pueda realizar los cálculos. (Administrador del Mercado Mayorista, 2000, p.4)

7.4.3. Precio *spot*

También conocido como Precio de Oportunidad de la Energía (POE) en el Mercado Mayorista de Guatemala:

Costo Marginal de Corto Plazo de la Energía en cada hora, definido como el costo en que incurre el Sistema Eléctrico para suministrar un kilovatio-hora (kWh) adicional de energía a un determinado nivel de demanda de potencia y considerando el parque de generación y transmisión efectivamente disponible. (Administrador del Mercado Mayorista, 2000, p.1)

7.4.4. Oferta firme y oferta firme eficiente centrales hidroeléctricas

En concordancia con el AMM se denomina, como oferta firme (OF):

De cada unidad generadora de los Participantes Productores a la máxima potencia neta – descontados sus consumos internos - capaz de producir, en función de sus características técnicas, su Potencia Máxima y disponibilidad, teniendo en cuenta las restricciones propias de la central o de su sistema de transmisión asociado. La suma de la Oferta Firme de todas las unidades generadoras de un Participante Productor se denomina Oferta Firme Total (OFT). (Administrador del Mercado Mayorista, 2001, p.1).

La oferta firme eficiente, según lo establecido por el Administrador del Mercado Mayorista (2001) se define como: “Es la cantidad máxima de potencia de una unidad, central generadora o Transacción Internacional que puede comprometerse en contratos para cubrir la Demanda Firme” (p.5).

7.5. Disponibilidad e indisponibilidad de centrales de generación

La disponibilidad de las centrales es atribuible por el AMM cuando una determinada planta es convocada a generar y suministrar energía a la red eléctrica y es capaz de cumplir con dicho requerimiento.

Por otro lado el AMM tipifica los estados de indisponibilidad como: mantenimiento programado, degradación de capacidad, mantenimiento programado con degradación, causa externa, disparo de unidad, excedente de mantenimiento, falla al ser convocado, mantenimiento no programado y salida forzada.

7.5.1. Coeficiente de disponibilidad

Valor adimensional expresado en porcentaje (%), el cual es indicativo para la asignación de la oferta firme y oferta firme eficiente, en concordancia con Administrador del Mercado Mayorista (2001) se define: “con un programa de cómputo generará las órdenes de prueba que aseguren un procedimiento objetivo e imparcial de la prueba de la disponibilidad de cada central o unidad generadora de cada Participante Productor. Este programa debe estar basado en un algoritmo de muestreo estadístico” (p.14).

7.5.2. Transacción de desvíos de potencia

En términos generales se puede decir que son los saldos a favor o saldos que deben sufragar los participantes del Mercado Mayorista, derivado de las operaciones comerciales que se realizan en el mismo y que serán definidos por el AMM, como resultados mensuales de despacho.

Lo anterior en concordancia a lo estipulado por Administrador del Mercado Mayorista (2001) “Es el conjunto de intercambios en el Mercado Mayorista, que resulta de los excedentes o faltantes de potencia comprometida en contratos entre sus participante” (p.1).

7.5.3. Generación forzada

De acuerdo con Administrador del Mercado Mayorista (2001) se define como: “Energía producida por una unidad generadora requerida para operar por razones distintas a su Costo Variable de Generación. No se considerará forzada a la generación hidroeléctrica que se ocasiona por requerimientos de aguas abajo y por necesidad de mantener niveles máximos de embalse o para evitar vertimientos” (p.2).

8. ÍNDICE PROPUESTO

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ÍNDICE DE TABLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

1.1. Energía hidroeléctrica

1.1.1. Antecedentes de la energía hidroeléctrica

1.1.2. Clasificación de las centrales hidroeléctricas

1.1.3. Proceso de transformación de la energía hidroeléctrica

1.1.4. Ventajas y desventajas de las centrales hidroeléctricas

1.2. Participación de la energía hidroeléctrica en el subsector eléctrico Guatemalteco

1.2.1. Capacidad instalada del parque de generación de Guatemala

1.2.2. Generalidad de los costos asociados a la generación
hidroeléctrica

1.2.3. Participación de las hidroeléctricas en la producción de
energía

1.2.4. Potencial hidroeléctrico en Guatemala

1.3. Seguridad de presas de uso hidroeléctrico

1.3.1. Presa

- 1.3.2. Hitos acerca de las presas
- 1.3.3. Tipología de presas
 - 1.3.3.1. Presas de gravedad
 - 1.3.3.2. Presas de materiales sueltos
- 1.3.4. Estructuras accesorias
- 1.3.5. Marco regulatorio de seguridad de presas en Guatemala
- 1.3.6. Consideraciones generales para la gestión de seguridad de presas
 - 1.3.6.1. Aspectos hidrológicos-hidráulicos
 - 1.3.6.2. Aspectos estructurales
 - 1.3.6.3. Aspectos geológicos-geotécnicos
 - 1.3.6.4. Aspectos de equipamiento, instalaciones, accesos y comunicaciones
- 1.3.7. Consideraciones generales de fallas en presas
- 1.4. Aspectos relevantes en la producción de energía en Guatemala
 - 1.4.1. Oferta de energía
 - 1.4.2. Costos variables de generación
 - 1.4.3. Precio *spot*
 - 1.4.4. Oferta firme y oferta firme eficiente centrales hidroeléctricas
- 1.5. Disponibilidad e indisponibilidad de centrales de generación
 - 1.5.1. Coeficiente de disponibilidad
 - 1.5.2. Transacción de desvíos de potencia
 - 1.5.3. Generación forzada

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES
RECOMENDACIONES
REFERENCIAS
ANEXOS

9. METODOLOGÍA

La metodología del presente trabajo de investigación estará basada en un estudio de tipo descriptivo con un diseño no experimental, el cual se realizará mediante un análisis técnico-económico de indisponibilidades que tienen su origen respecto a las presas y estructuras accesorias de las centrales hidroeléctricas, lo cual es fiscalizable para los productores de energía hidroeléctrica con base en las Normas de Seguridad de Presas que fueron emitidas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), esto permite flexibilidad y estructura propia, en el desarrollo de la misma.

Todas las variables económicas y técnicas que deben ser tomadas en cuenta en la metodología y el análisis de indisponibilidades de presas, con la finalidad de determinar indicadores que coadyuven a fortalecer y mejorar la gestión de seguridad de presas de uso hidroeléctrico, es por ello que, los resultados a obtener podrían servir como marco referencia para: la implementación de nuevas prácticas de seguridad de presas y análisis económicos en el caso de los agentes generadores. Para el caso del ente regulador estos podrían ser utilizados como oportunidades de mejora a las Normas de Seguridad de Presas o instrumentos que coadyuven a mejorar la gestión de la seguridad de las presas de uso hidroeléctrico.

Al no existir una fuente de conocimiento formal respecto al tema en cuestión, se torna necesario realizar indagaciones que estén alineadas a alcanzar los objetivos planteados anteriormente. Es por ello que el análisis documental de: las normas de seguridad de presas de la CNEE y las normas aplicables del AMM que forman parte de la regulación del subsector eléctrico guatemalteco, se considera relevantes, complementariamente se ha

considerado como otras inputs de investigación y desarrollo: criterios internacionales en materia de la gestión de seguridad de presas y entrevistas con los responsables de las unidades técnicas correspondientes.

9.1. Características del estudio

El enfoque del presente trabajo de investigación es mixto (cuantitativo y cualitativo), tomando en cuenta que a partir del análisis de variables cuantitativas se busca establecer outputs cualitativos.

El alcance es descriptivo, dado que a lo largo del desarrollo del presente trabajo se detallará, lo concerniente al efecto técnico y económico de las indisponibilidades producción hidroeléctrica considerando la asociación de sus respectivas variables.

El diseño de la investigación es de tipo no experimental, debido a que el análisis técnico-económico de las indisponibilidades de presas de uso hidroeléctrico, se apegará al marco normativo actual que aplique tanto del ente operador como el ente regulador del subsector eléctrico en Guatemala, determinando y proponiendo mejoras a las Normas de Seguridad de Presas, en busca de mejorar la gestión de seguridad de presas, además, se considera transversal considerando que se observará a un tipo de generación eléctrica específico como lo es la que se realiza a través de hidroeléctricas

9.2. Unidades de análisis

La población en estudio será el conjunto de hidroeléctricas que son objeto de fiscalización por parte de las Normas de Seguridad de Presas, la cual se encuentra dividida en subpoblaciones dadas por la clasificación otorgada por la CNEE y el tipo de presa, de la cual se extraerán muestras de forma intencional y directa, que serán estudiadas en su totalidad.

9.3. Variables

Las variables en estudio se describen a continuación:

Tabla IV. Definición teórica y operativa de variables

VARIABLE	TIPO DE VARIABLE	DEFINICIÓN TEÓRICA	DEFINICIÓN OPERATIVA
Tiempo indisponible por evento	Cuantitativa	Tiempo en el cual no existe producción de energía eléctrica por parte de una unidad de generación o por una central de generación, los tipos de Indisponibilidad son: Mantenimiento programado, degradación de capacidad, mantenimiento programado con degradación, causa externa, disparo de unidad, extensión de mantenimiento, falla al ser convocado, mantenimiento no programado y salida forzada.	Horas (Hrs.)
Megavatios por hora	Cuantitativa	Energía eléctrica producida en un tiempo determinado.	MWh
Quetzales por megavatios hora	Cuantitativa	Monto pecuniario que se percibe o eroga por la producción de energía eléctrica.	QMWh

Fuente: elaboración propia.

9.4. Fases del estudio

El trabajo de investigación se acota en tres fases, las cuales son secuencialmente dependientes, no siendo así el caso para las actividades que conllevan la realización de cada fase. Tanto para las fases como para las actividades se ejecutaran de una forma sistémica, a continuación se amplía más respecto a cada una de las fases, enfatizando las técnicas que aplicarán y las actividades que se realizarán:

9.4.1. Fase 1: recopilación y ordenamiento de la información

Etapa en la cual se procederá a compilar documentación relacionada a las temáticas de investigación, siendo de interés principal, lo concerniente a: el proceso e infraestructura asociada a la generación hidroeléctrica, participación de la energía hidroeléctrica en Guatemala, seguridad de presas y su regulación.

Las principales referencias documentales que se han considerado como fuente de consulta son: normativas, libros, artículos académicos, artículos científicos y otros documentos relacionados a indagaciones in situ con entes como la CNEE y el AMM.

La información documental se clasificara según el desarrollo de índice preliminar, los datos obtenidos deberán ser segmentados en cualitativos y cuantitativos. Para el caso de los datos cuantitativos se establecerá una longitud o rango adecuado al diseño de la investigación.

9.4.2. Fase 2: análisis de datos

Seguidamente de la recopilación y ordenamiento documental, se procederá a realizar una condensación o consolidación de los datos obtenidos, lo cual ayudará a inferir y describir lo relacionado a las indisponibilidades, las implicaciones técnico-económicas tanto para el proceso y los agentes hidroeléctricos y determinar las bases para el diseño y propuesta de mejora a la gestión de seguridad de presas.

La utilización de herramientas de análisis estadístico descriptivo, se tornan importantes para el procesamiento y presentación de los datos cualitativos que se recaben y utilicen en el desarrollo de la investigación.

9.4.3. Fase 3: diseño y propuestas de mejoras a la gestión de seguridad de presas

Durante esta etapa se formularan los instrumentos de apoyo orientativos, en pro de la gestión de seguridad de presas en apego a normativas de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica y del Administrador del Mercado Mayorista que apliquen y estén alineadas con el trabajo de investigación.

Se ha considerado dentro de dichos instrumentos: procedimientos o metodologías de cálculo de pérdidas económicas por la no generación hidroeléctrica, flujogramas de gestión, propuesta de reforma a las Normas de Seguridad de Presas.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Al tomar en cuenta que la generación eléctrica de Guatemala se realiza con distintos tipos de tecnología, pero que la presente investigación está centrada en tópicos de la producción hidroeléctrica y que la información que se analizará cuenta tanto con datos cualitativos como en cuantitativos, para la recopilación y análisis de la información se utilizarán técnicas estadísticas descriptivas.

La estadística descriptiva también es conocida como estadística deductiva, con base a dichas técnicas se puede resumir las cantidades de largas listas de valores, de acuerdo con Walpole, Raymond, Sharon y Ye (2012) “La estadística descriptiva va acompañada de gráficas. El software estadístico moderno permite el cálculo de medias, medianas, desviaciones estándar y otros estadísticos de una sola cifra, así como el desarrollo de gráficas que presenten una huella digital” (p.3).

Hernández, Fernández, y María (2014) refieren: “Las tres fases esenciales de los diseños de investigación-acción son: observar (construir un bosquejo del problema y recolectar datos), pensar (analizar e interpretar) y actuar (resolver problemáticas e implementar mejoras), las cuales se dan de manera cíclica” (p.497).

Con base en lo descrito anteriormente, se listan las siguientes etapas, las cuales complementan las tres fases generales presentadas anteriormente:

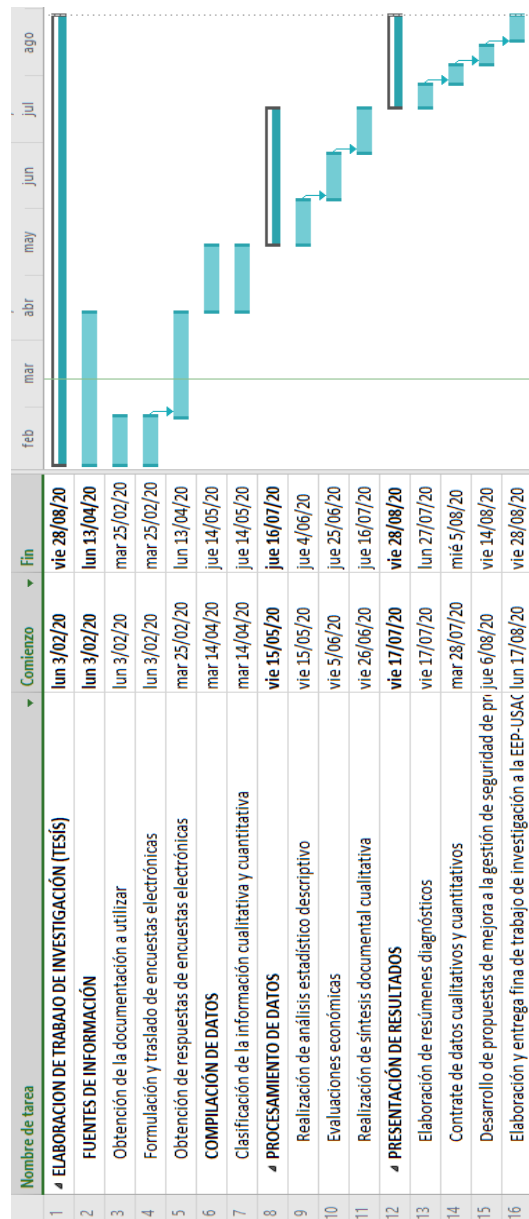
- Fuentes de la información: se han considerado normativas aplicables de la CNEE y el AMM, realización de encuestas digitales a técnicos especialistas en materia de seguridad de presas tanto del ente fiscalizador

como de agentes fiscalizables, datos estadísticos que se puedan obtener a nivel regional, otros documentos que por su naturaleza apliquen.

- **Compilación datos:** previo al procesamiento y manejo de datos y luego de haber recabado la información necesaria, esta deberá ser tipificada o clasificada según su naturaleza la cual puede ser cualitativa o cuantitativa pudiendo existir resultados transversales.
- **Procesamiento de datos:** etapa que consistirá en realizar inicialmente un análisis estadístico a la data cuantitativa obtenida, para poder tratar de establecer tendencias en materias de seguridad de presas y proyecciones económicas de la producción hidroeléctrica. Se elaboraran tablas, histogramas u otro tipo de gráficos representativos de la información obtenida, para ello se torna importante la realización de hojas de cálculo a través de herramientas ofimáticas aplicables o idóneas que resalten las características más relevantes de dicha data. La data cualitativa que estará basada en normativas y otros documentos complementará y dará soporte a los resultados para su posterior presentación.
- **Presentación de resultados:** fase en la cual los datos previamente procesados se referirá de una manera más organizada y condensada, infiriendo oportunidades de mejora en la gestión de seguridad de presas y cálculo de las pérdidas pecuniarias derivado a la no generación hidráulica como: definición de metodologías o procedimientos con enfoque normativo, marco propositivo a reformas en materias de las Normas de Seguridad de Presas.

11. CRONOGRAMA

Figura 11. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

La realización del trabajo de investigación es factible, dicha aseveración radica en la disponibilidad de los recursos que conllevará la ejecución de la misma. La tabla inferior ejemplifica los recursos contemplados, cuya fuente de financiamiento es propia.

Tabla V. Recursos e insumos a utilizar

No.	RECURSO	TIPO DE RECURSO	COSTO	CANTIDAD	COSTO TOTAL POR RECURSO	PORCENTAJE
1	Equipo de cómputo	Equipo	Q 4,000.00	1	Q 4,000.00	8.3
2	Energía eléctrica (Kw/h)	Suministro	Q 1.25	400	Q 500.00	1.00
3	Telefonía móvil e internet mensual	Suministro	Q 300.00	6.2	Q 1,860.00	3.73
4	Impresora	Equipo	Q 700.00	1	Q 700.00	1.41
5	Tinta para impresora	Materiales	Q 75.00	6	Q 450.00	0.90
6	Papelería y utilices de oficina	Materiales	Q 300.00	1	Q 300.00	0.60
7	Honorarios de asesor por hora	Humano	Q 83.00	30	Q 2,490.00	5.00
8	Honorarios de tesista por hora	Humano	Q 50.00	780	Q 39,000.00	78.31
9	Imprevistos	Imprevistos	Q 500.00	1	Q 500.00	1.00
COSTO TOTAL DE LA INVERSIÓN					Q 49,800.00	100.00

Fuente: elaboración propia.

13. REFERENCIAS

1. Administrado del Mercado Mayorista. (2018). *Informe Estadístico 2018*. Guatemala.
2. Administrador del Mercado Mayorista. (2000). *Resolución 157-02. Norma de Coordinación Comercial No. 4 - Precio de Oportunidad de la Energía*. Guatemala.
3. Administrador del Mercado Mayorista. (2000). *Resolución No. 157-01. Norma de Coordinación Comercial No. 1 - Coordinación de Despacho de Carga*. Guatemala.
4. Administrador del Mercado Mayorista. (2001). *Resolución No. 216-01. Norma de Coordinación Comercial No. 2 - Oferta y Demanda Firme*. Guatemala.
5. Administrador del Mercado Mayorista. (2001). *Resolución No. 216-02. Norma de Coordinación Comercial No. 3 - Transacciones de Desvíos de Potencia*. Guatemala.
6. Administrador del Mercado Mayorista. (2001). *Resolución No. 217-01. Norma de Coordinación Comercial No. 5 - Sobrecostos de Unidades Generadoras Forzadas*. Guatemala.

7. Bueno, S. (abril, 2007). Gestión integral en obras hidráulicas, rentabilidad y calidad en la conducción de agua. *Revista de Arquitectura e Ingeniería. Volumen 1* (número 1) pp. 1-13. Matanzas, Cuba.
8. Comisión Internacional de Grandes Presas. (2007). *La presas y el agua en el mundo*. Recuperado de https://www.spancold.org/wp-content/uploads/2018/01/Las_presas_y_el_agua_en_el_mundo.pdf
9. Comisión Internacional de Grandes Presas. (s.f.). *ICOLD CIGB*. Recuperado de https://www.icold-cigb.org/GB/dams/dams_safety.asp.
10. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (2016). *Resolución CNEE-283-2016. Normas de Seguridad de Presas -NSP-*. Guatemala.
11. Congreso de la República de Guatemala. (15 de noviembre 1996). *Decreto No. 93-96, Ley General de Electricidad*. Diario de Centro América. Guatemala, Guatemala. Recuperado de <http://www.cnee.gob.gt/pdf/marco-legal/LEY%20GENERAL%20DE%20ELECTRICIDAD%20Y%20REGLAMENTOS.pdf>
12. Electricidad Ined Aneño Ency. (2011). *Historia de las hidroeléctricas en Guatemala*. Recuperado de <http://encv5toelectricidad2011ined.blogspot.com/2011/02/historia-de-las-hidroelectricas-en.html>
13. EPEC Educa. (2018). *Las centrales hidroeléctricas*. Recuperado de <https://www.epec.com.ar/institucional/epec-educa>

14. Fundación Solar. (2013). *Centrales Hidroeléctricas de pequeña escala*. Guatemala, Guatemala: Tritón imagen & comunicaciones.
15. Fundación Solar. (2013). *Medición del potencial hidrológico para generación de energía renovable*. Guatemala, Guatemala: Tritón imagen & comunicaciones.
16. Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill.
17. International Renewable Energy Agency (IRENA). (2012). *Renewable Energy Cost Analysis. Hydropower*. Abu Dabi, Emiratos Árabes Unidos: International Renewable Energy Agency.
18. International Renewable Energy Agency (IRENA). (2012). *Renewable Energy Cost Analysis - Hydropower*. International Renewable Energy Agency.
19. International Renewable Energy Agency. (2015). *Hydropower. Technology Brief*. Abu Dabi, Emiratos Árabes Unidos: International Renewable Energy Agency.
20. Ministerio de Energía y Minas. (diciembre, 2017). Costo Variable de Generación. *Revista anual de estadísticas del Ministerio de Energía y Minas. Volumen 1* (número 1) p. 6. Ministerio de Energía y Minas. Guatemala, Guatemala.

21. Ministerio de Energía y Minas. (2018). *Centrales Hidroeléctricas*. Guatemala.
22. Organismo Regulador de Seguridad de Presas (ORSEP). (2010). *Más de 10 años fiscalizando la seguridad estructural y operativa de las presas*. Buenos Aires, Argentina: ORSEP.
23. Organismo Regulador de Seguridad de Presas (ORSEP). (s.f.). *Crecer junto al dique*. Buenos Aires, Argentina: ORSEP.
24. Reglamento de la Ley General de Electricidad. Acuerdo Gubernativo Número 256-97. Diario de Centro América (2 de abril 1997). Guatemala, Guatemala. Recuperado de <http://www.cnee.gob.gt/pdf/marco-legal/LEY%20GENERAL%20DE%20ELECTRICIDAD%20Y%20REGLAMENTOS.pdf>
25. Soriano, A., y Escuder I. (noviembre, 2008). El comportamiento de las presas y la gestión integral de su seguridad. *Revista de Obras Públicas*. Número 3 (493), pp. 89-108. Madrid, España.
26. Universidad Rafael Landívar. (2018). *Perfil energético de Guatemala. Bases para el entendimiento del estado actual y tendencias de la energía*. Guatemala: Universidad Rafael Landívar.
27. Walpole, R., Raymond, M., Sharon, M., y Ye, K. (2012). *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*. México, México: Pearson Educación.