



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

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO TÉCNICO-ECONÓMICO DE LA OPERACIÓN DEL PARQUE
GENERADOR HIDROELÉCTRICO EN EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE
GUATEMALA (2012-2018) Y LAS PERSPECTIVAS DEL DESEMPEÑO DEL MISMO PARA
EL AÑO 2027**

Rodrigo Ovando Contenti

Asesorado por el Ing. Fernando Alfredo Moscoso Lira

Guatemala, marzo de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO TÉCNICO - ECONÓMICO DE LA OPERACIÓN DEL PARQUE
GENERADOR HIDROELÉCTRICO EN EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE
GUATEMALA (2012-2018) Y LAS PERSPECTIVAS DEL DESEMPEÑO DEL MISMO PARA
EL AÑO 2027**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

RODRIGO OVANDO CONTENTI

ASESORADO POR EL ING. FERNANDO ALFREDO MOSCOSO LIRA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, MARZO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordoba Estrada
EXAMINADOR	Ing. Carlos Fernando Rodas.
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
EXAMINADOR	Ing. Fernando Alfredo Moscoso Lira
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:

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO TÉCNICO - ECONÓMICO DE LA OPERACIÓN DEL PARQUE
GENERADOR HIDROELÉCTRICO EN EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE
GUATEMALA (2012-2018) Y LAS PERSPECTIVAS DEL DESEMPEÑO DEL MISMO PARA
EL AÑO 2027**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 11 de marzo de 2019

Rodrigo Ovando Contenti

Guatemala, 22 de noviembre de 2019

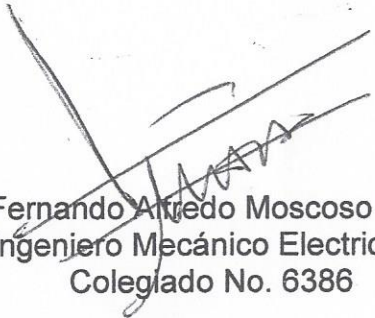
Coordinación Área de Potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Coordinador

Por este medio tengo a bien informarle que he realizado la revisión técnica del Trabajo de Graduación titulado "EVALUACIÓN DEL IMPACTO TÉCNICO - ECONÓMICO DE LA OPERACIÓN DEL PARQUE GENERADOR HIDROELÉCTRICO EN EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE GUATEMALA (2012-2018) Y LAS PERSPECTIVAS DEL DESEMPEÑO DEL MISMO PARA EL AÑO 2027" elaborado por el estudiante Rodrigo Ovando Contenti carnet número 2012-12514, por lo cual, considero que el trabajo de graduación cumple con el alcance y los objetivos definidos para su desarrollo, sometiendo a su consideración la aprobación del mismo, siendo responsables del contenido técnico el estudiante y el suscrito, en calidad de asesor.

Sin otro particular,

Atentamente,



Fernando Alfredo Moscoso Lira
Ingeniero Mecánico Electricista
Colegiado No. 6386

Fernando Alfredo Moscoso Lira
Ingeniero Mecánico Electricista
Colegiado No. 6386



REF. EIME 81. 2020.

22 de noviembre 2019.

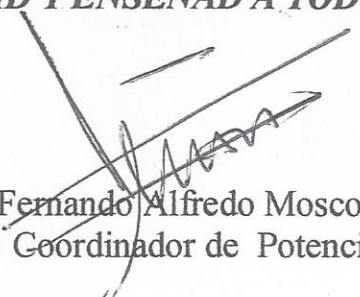
Señor Director
Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL IMPACTO TÉCNICO- ECONÓMICO DE LA OPERACIÓN DEL PARQUE GENERADOR HIDROELÉCTRICO EN EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE GUATEMALA (2012 -2018) Y LAS PERSPECTIVAS DEL DESEMPEÑO DEL MISMO PARA EL AÑO 2027**, del estudiante; **Rodrigo Ovando Contenti**, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Fernando Alfredo Moscoso Lira
Coordinador de Potencia





REF. EIME 01. 2020.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante: **RODRIGO OVANDO CONTENTI** titulado: **EVALUACIÓN DEL IMPACTO TÉCNICO- ECONÓMICO DE LA OPERACIÓN DEL PARQUE GENERADOR HIDROELÉCTRICO EN EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE GUATEMALA (2012 -2018) Y LAS PERSPECTIVAS DEL DESEMPEÑO DEL MISMO PARA EL AÑO 2027**, procede a la autorización del mismo.

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo



GUATEMALA, 15 DE ENERO 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 Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL IMPACTO TÉCNICO-ECONÓMICO DE LA OPERACIÓN DEL PARQUE GENERADOR HIDROELÉCTRICO EN EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE GUATEMALA (2012-2018) Y LAS PERSPECTIVAS DEL DESEMPEÑO DEL MISMO PARA EL AÑO 2027**, presentado por el estudiante universitario: **Rodrigo Ovando Contenti**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, marzo de 2020

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

- Mi hija** Fátima Ovando, por ser mi inspiración.
- Mi abuelo** Víctor Ovando, por el cariño que me dio durante toda mi vida.
- Mi padre** Edgar Ovando, por su incondicional apoyo emocional y económico, así como su cariño y paciencia.
- Mi madre** Esther Contentí, por su cariño y apoyo incondicional.
- Mis hermanos** Isabel y Gabriel Ovando, por su apoyo.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por permitirme formarme como profesional
Facultad de Ingeniería	Por brindarme los conocimientos para desempeñarme como profesional.
Mis amigos de la Facultad	Walter Mendoza, Renato Díaz, David López, Marco Flores y Juan Pablo Segura, por su amistad y tiempo compartido.
La Comisión Nacional de Energía Eléctrica	Por formarme en el campo profesional y permitirme poner en práctica.
Mis compañeros de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica	Por el tiempo compartido y su ayuda en la elaboración del presente estudio, en especial a Brandon Mérida y Jonathan Ramírez.
Ingeniero Fernando Moscoso	Por introducirme al sector de la industria eléctrica, trasladarme su conocimiento y apoyarme en mi desarrollo profesional.
Ingeniero German Juárez	Por su amistad y apoyo en mi desarrollo profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA	1
1.1. Elementos de los sistemas eléctricos de potencia	1
1.1.1. Generadores.....	1
1.1.2. Transformadores	2
1.1.3. Líneas de transmisión.....	3
1.1.4. Barra.....	4
1.1.5. Equipos de protección y maniobra.....	4
1.1.5.1. Interruptor de potencia.....	4
1.1.5.2. Seccionadores	4
1.1.6. Carga eléctrica.....	5
1.2. Historia de los sistemas eléctricos de potencia	5
1.2.1. Integración de las actividades.....	7
1.2.1.1. Integración vertical.....	7
1.2.1.2. Integración horizontal	7
1.3. Abastecimiento de la demanda	7
1.3.1. Producción de energía eléctrica	8
1.3.1.1. Centrales termoeléctricas	8
1.3.1.2. Centrales hidroeléctricas	11

	1.3.1.3.	Centrales renovables intermitentes	12
1.3.2.		Transporte de energía eléctrica.....	13
	1.3.2.1.	Niveles de tensión	13
1.3.3.		Distribución de energía eléctrica	14
	1.3.3.1.	Niveles de tensión	14
1.3.4.		Consumo de energía eléctrica.....	14
	1.3.4.1.	Usuarios	14
	1.3.4.2.	Demanda.....	15
		1.3.4.2.1. Banda de valle	16
		1.3.4.2.2. Banda intermedia	16
		1.3.4.2.3. Banda de punta.....	16
	1.3.4.3.	Demanda total	17
1.4.		Situación del sistema nacional interconectado.....	19
	1.4.1.	Matriz de generación y capacidad instalada.....	21
	1.4.2.	Combustibles.....	24
1.5.		Funcionamiento de los sistemas eléctricos de potencia.....	26
1.6.		Operación y despacho	30
	1.6.1.	Principios del despacho	30
	1.6.2.	Despacho económico	31
2.		DESVIACIONES DE POTENCIA ACTIVA	33
2.1.		Centrales hidroeléctricas	33
	2.1.1.	Partes de una central hidroeléctrica	34
		2.1.1.1. Obra civil	34
		2.1.1.1.1. Azud	34
		2.1.1.1.2. Presa y embalse	34
		2.1.1.1.3. Canal de conducción.....	34
		2.1.1.1.4. Desarenador	35
		2.1.1.1.5. Cámara de carga	35

	2.1.1.1.6.	Tubería de presión	35
	2.1.1.1.7.	Chimenea	35
	2.1.1.1.8.	Canal de descarga	36
	2.1.1.2.	Turbina hidráulica	36
	2.1.1.3.	Tipos de turbinas	37
	2.1.1.3.1.	Turbina Pelton	37
	2.1.1.3.2.	Turbina Francis.....	38
	2.1.1.3.3.	Turbina Kaplan	39
	2.1.1.4.	Generador.....	39
2.2.		Regiones hidráulicas (vertientes)	40
2.3.		Caracterización del estudio	45
	2.3.1.	Desviaciones del parque generador	47
2.4.		Perfil típico.....	54
3.		IMPACTO TÉCNICO DE LAS DESVIACIONES DE POTENCIA	59
	3.1.	Pérdidas de energía por efecto Joule	59
	3.2.	Simulación.....	60
	3.2.1.	Premisas de la simulación	60
	3.3.	Análisis de los resultados	62
4.		IMPACTO ECONÓMICO DE LAS DESVIACIONES	73
	4.1.	Costo total de la operación	73
	4.2.	Sobrecostos por las desviaciones	74
	4.3.	Análisis de los resultados	76
5.		PERSPECTIVAS DE LA CAPACIDAD INSTALDA Y OPERACIÓN	77
		CONCLUSIONES	81
		RECOMENDACIONES	83

BIBLIOGRAFÍA.....85

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Proceso energético	2
2.	Proceso energético de transformación de magnitudes	2
3.	Línea de transmisión	3
4.	Seccionadores	5
5.	Proceso de conversión turbina de vapor	9
6.	Proceso de conversión motor.....	10
7.	Proceso de conversión turbina de gas	11
8.	Generador hidroeléctrico.....	12
9.	Conversión energético de una turbina eólica	12
10.	Curva típica de demanda de energía eléctrica de Guatemala	15
11.	Demanda nacional y demanda total.....	18
12.	Evolución de la capacidad instalada	22
13.	Potencia disponible (2012 - 2018).....	23
14.	Potencia disponible por combustible.....	25
15.	Diagrama unifilar	29
16.	Turbina Pelton.....	37
17.	Turbina Francis	38
18.	Vertientes en Guatemala.....	41
19.	Diferencias programado y ejecutado.....	46
20.	Comportamiento desviaciones (baja producción)	49
21.	Comportamiento desviaciones (alta producción)	50
22.	Promedio desviaciones horarias (alta producción).....	52
23.	Promedio desviaciones (baja producción).....	54

24.	Perfil de generación (Mar Caribe)	55
25.	Perfil de generación (Golfo de México)	56
26.	Perfil de generación (Pacífico)	57
27.	Despacho considerado en los escenarios	63
28.	Diferencias entre escenarios	64
29.	Pérdidas de potencia activa	65
30.	Pérdidas por nivel de tensión.....	67
31.	Central	68
32.	Occidente.....	69
33.	Oriente	70
34.	Troncal.....	71
35.	Desviaciones 2017-2018	74
36.	Sobre costos	75

TABLAS

I.	Bandas horarias.....	17
II.	Factor de carga.....	20
III.	Capacidad instalada al 2018 por tecnología	22
IV.	Combustibles	24
V.	Centrales hidroeléctricas (Golfo de México)	42
VI.	Centrales hidroeléctricas (Mar Caribe).....	42
VII.	Centrales hidroeléctricas (Pacífico)	43
VIII.	Meses de alta y baja producción.....	49
IX.	Desviaciones de potencia activa promedio	51
X.	Desviaciones de potencia activa promedio	53
XI.	Factor de utilización (Mar Caribe)	56
XII.	Factor de utilización (Golfo de México)	57
XIII.	Factor de utilización (Pacífico)	58

XIV.	Características de los escenarios simulados.....	60
XV.	Demanda escenarios	61
XVI.	Energía generada escenarios	61
XVII.	Porcentaje de pérdidas	66
XVIII.	Centrales hidroeléctricas futuras	77
XIX.	Crecimiento de la capacidad instalada.....	78
XX.	Tipo de recurso	78
XXI.	Matriz histórica de generación.....	79

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperio
E	Campo eléctrico
σ	Conductividad
I	Corriente eléctrica
D_n	Demanda
D_{max}	Demanda máxima
J	Densidad de corriente eléctrica
D	Desviación de potencia activa
\$	Dólares de los Estados Unidos de América
f_{carga}	Factor de carga
F_{em}	Fuerza electromotriz
Φ	Flujo magnético
m	Metro
m^2	Metro cuadrado
N	Numero de espiras
MW	Potencia
P	Potencia eléctrica activa
R	Potencia generada real
R	Resistencia
Σ	Sumatoria
V	Voltaje

GLOSARIO

Despacho económico	Conjunto de operaciones resultado de una optimización, que resultan en el mínimo costo de la operación.
Generador	Es un dispositivo capaz de mantener una diferencia de potencial entre dos de sus puntos, transformando la energía mecánica en eléctrica.
Interconexión	Es el punto en el que se unen o conectan dos puntos de un sistema eléctrico.
Operador de sistema	Ente especializado encargado de coordinar y operar las maniobras dentro de un sistema eléctrico de potencia.
Posdespacho	Informe que contiene los resultados de la operación diaria del sistema eléctrico de potencia.
Potencia activa	Representa la capacidad de un circuito para realizar un proceso de transformación de la energía eléctrica en trabajo.
Programa diario	Informe que contiene los resultados de la optimización de los recursos disponibles, asignación de reservas, servicios y órdenes de despacho.

RESUMEN

Mediante el presente estudio se analizó el comportamiento del parque generador hidroeléctrico, para demostrar el impacto técnico y económico que produce su operación cuando este no se apega a lo programado. A la cantidad de potencia que los generadores hidroeléctricos dejaron de generar se le denominó desviación.

La operación de los sistemas eléctricos de potencia modernos se realiza de forma óptima, minimizando el costo total de la operación. Esto se lleva a cabo mediante modelos matemáticos que consideran la disponibilidad de los equipos, condiciones de la red de transporte y fuentes primarias de energía. Por lo tanto, los resultados de la optimización constituyen el valor óptimo de generación que cada generador debe aportar cada hora. Cualquier operación que se realice por fuera de los valores óptimos tiene impactos técnicos y económicos respecto del conjunto de operaciones optimizadas.

En el primer capítulo se realizó una breve descripción de los sistemas eléctricos de potencia, los equipos que lo conforman, las tecnologías que se utilizan para la generación de energía eléctrica y su transporte, la demanda de energía eléctrica de Guatemala y el despacho económico.

En el segundo capítulo, utilizando los resultados de la operación del parque generador publicados por el operador del sistema guatemalteco, se analizó el comportamiento del parque hidroeléctrico, se separan por vertientes para determinar los valores y formas en las que se desvió de lo programado. Se

estableció que existe una forma sistemática en la que los generadores se desvían a lo largo de la operación diaria.

En el tercer capítulo, mediante simulaciones se determinaron las variaciones en las pérdidas por efecto Joule del sistema de transporte guatemalteco. Se consideró el escenario óptimo y el escenario en el que los generadores hidroeléctricos se desvían de lo programado de forma consistente con lo determinado en el capítulo dos.

En el cuarto capítulo, se realizó el cálculo del impacto económico que tienen las desviaciones de potencia activa del parque generador hidroeléctrico sobre el costo total de la operación.

Finalmente se realizó una pequeña reseña sobre el crecimiento y comportamiento esperado del parque generador hidroeléctrico al año 2027, considerando los planes de expansión de la generación y transporte realizados por el Ministerio de Energía y Minas de Guatemala.

OBJETIVOS

General

Determinar el impacto que causan las desviaciones de potencia activa de las centrales hidroeléctricas respecto al programa de despacho diario en la operación del sistema eléctrico de Guatemala para los escenarios de demanda mínima, media y máxima.

Específicos

1. Agrupar las centrales hidroeléctricas por vertiente (regiones hidráulicas), caracterizar su perfil de generación programado y el ejecutado en tiempo real.
2. Determinar el valor de potencia activa por regiones hidráulicas en los que se desvían las centrales hidroeléctricas respecto de lo programado de forma típica por banda.
3. Determinar las pérdidas en el sistema de transmisión existente para el año estacional 2012-2018 (230 kV, 138 kV y 69 kV).
4. Determinar el impacto económico de las desviaciones del parque generador hidroeléctrico en la operación del sistema eléctrico de potencia de Guatemala.

5. Proyectar el crecimiento de la capacidad instalada del parque generador hidroeléctrico al año 2027.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de potencia son el conjunto de generadores, líneas de transmisión, equipos de transformación y todos aquellos equipos de maniobra, medición y protección asociados a los mismos. Estos permiten abastecer los requerimientos de demanda de energía eléctrica de los usuarios. Su operación está a cargo de entes especializados denominados operadores de sistema.

Con la implementación de la Ley General de Electricidad, reglamentos y normativa afín, en Guatemala se introdujo un modelo de mercado basado en despacho, el cual busca garantizar el suministro de energía eléctrica mediante la operación de un sistema eléctrico de potencia al mínimo costo, cumpliendo con los criterios de calidad y seguridad operativa que se establecen en los ya referidos documentos.

Bajo la premisa de abastecer la demanda de energía eléctrica y minimizar el costo total de la operación, el operador de sistema es el encargado de optimizar el despacho, tomando en cuenta la oferta disponible (todos y cada uno de los generadores e interconexiones internacionales que se encuentran conectados y disponibles para generar) y las restricciones del sistema de transporte de energía eléctrica, para obtener como resultado un conjunto de operaciones a seguir.

Sin embargo, durante la operación en tiempo real surgen contingencias e imprevistos que desvían los valores óptimos programados para la operación e impactan tanto de forma técnica como económica. Por lo que, el presente

estudio busca medir mediante un análisis cuantitativo de las desviaciones de los valores óptimos programados en el despacho, el impacto en las pérdidas por efecto Joule en el sistema eléctrico interconectado de Guatemala, así como determinar las posibles causas.

1. SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

La interconexión del conjunto de equipos eléctricos diseñados para la generación, transporte y consumo de energía eléctrica da lugar a los denominados sistemas eléctricos de potencia, los cuales tienen como finalidad crear y transportar energía para abastecer la demanda de los consumidores.

1.1. Elementos de los sistemas eléctricos de potencia

Los principales elementos de dichos sistemas son los que se describen a continuación:

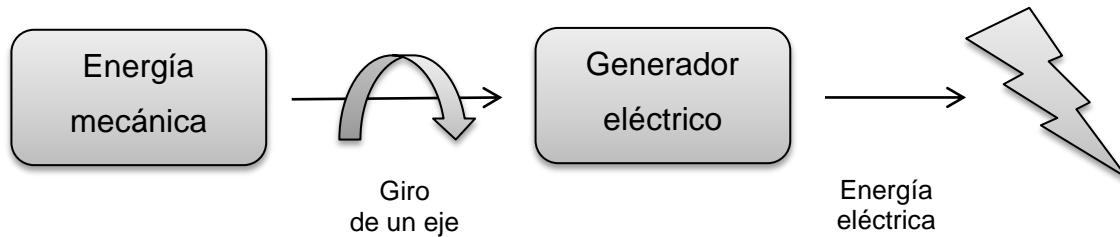
1.1.1. Generadores

Son máquinas especializadas y diseñadas para la transformación de energía proveniente de fuentes primarias en energía eléctrica. Generalmente son máquinas giratorias, con excepción de la tecnología fotovoltaica.

Existen dos tipos de generadores, los cuales se conocen como síncrono y asíncrono. El principio básico de su funcionamiento es el mismo, la inducción electromagnética; sin embargo, sus características operativas, construcción, diseño y aplicaciones, varían.

A continuación se muestra el proceso energético que siguen los generadores para la transformación de la energía:

Figura 1. **Proceso energético**



Fuente: elaboración propia.

1.1.2. Transformadores

Son máquinas estacionarias, diseñadas para la transformación de niveles de energía potencial y corriente eléctrica. Estos equipos, mediante un circuito magnético (núcleo), trasladan de un punto a otro la energía eléctrica. Dependiendo del número de espiras de los devanados (los cuales son material conductor arrollado en el núcleo) proporcionan distintos niveles de voltaje para su transmisión o consumo en tensiones normalizadas.

A continuación se muestra el proceso energético de transformación de magnitudes de energía potencial eléctrica (voltaje) y corriente eléctrica del transformador.

Figura 2. **Proceso energético de transformación de magnitudes**



Fuente: elaboración propia.

1.1.3. Líneas de transmisión

Son elementos conductores de energía eléctrica que interconectan las distintas partes de un sistema eléctrico. Generalmente son soportadas por torres o postes.

Figura 3. Línea de transmisión



Fuente: archivo de registro fotográfico de la CNEE.

1.1.4. Barra

Son elementos conductivos, generalmente emplazados en subestaciones, donde se conectan las líneas de transmisión, transformadores y demás equipos que componen en los sistemas eléctricos de potencia. Desde el punto de vista eléctrico son nodos; es decir, puntos en la red donde entran y salen corrientes.

1.1.5. Equipos de protección y maniobra

A continuación, se describe el equipo de protección y maniobra.

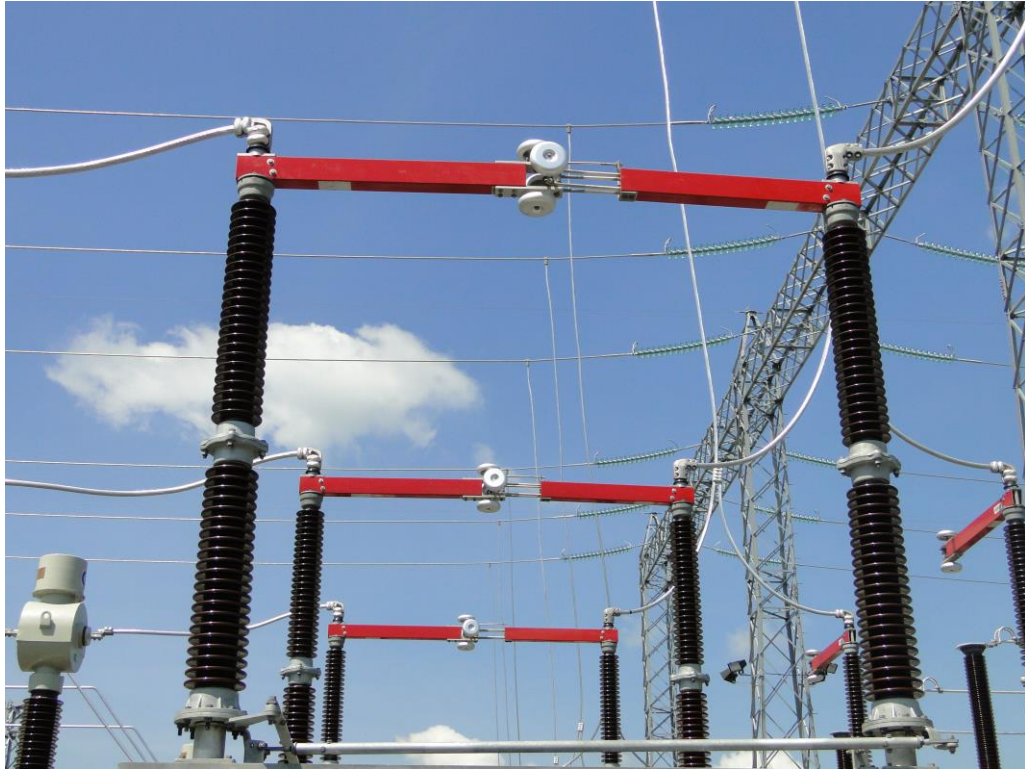
1.1.5.1. Interruptor de potencia

Es un equipo diseñado para la interrupción de corrientes eléctricas bajo condiciones de falla. Su principal función es la de aislar eléctricamente tramos que usualmente se encuentran conectados, pero que por condiciones de falla, maniobra o mantenimiento se deben desconectar.

1.1.5.2. Seccionadores

Es un equipo de maniobra que permite desconectar y aislar eléctricamente tramos; Estos equipos, a diferencia del interruptor de potencia, no pueden interrumpir corrientes eléctricas.

Figura 4. **Seccionadores**



Fuente: archivo de registro fotográfico de la CNEE.

1.1.6. Carga eléctrica

Son los elementos que consumen energía eléctrica. Dependiendo de sus características físicas pueden consumir energía activa y reactiva. Son representados como impedancias.

1.2. Historia de los sistemas eléctricos de potencia

En un inicio y con el fin de abastecer la demanda asociada a sistemas de iluminación, se instalaban generadores que operaban de forma aislada,

utilizando pequeñas redes de transporte en bajas tensiones. Estos sistemas, independientemente de su procedencia (privada o pública), fueron creciendo al ritmo del desarrollo tecnológico de las aplicaciones de la energía eléctrica, al punto de ya no solo abastecer sistemas de iluminación sino también motores eléctricos, calentadores y cualquier otro electrodoméstico.

En Guatemala, el sistema eléctrico de potencia fue desarrollado según los registros históricos desde octubre del año 1894, cuando el Ministerio de Fomento otorgó a Enrique Neutze el permiso para explotar las cascadas del río Michatoya en las cercanías de Palín, en el departamento de Escuintla, con el fin de generar energía eléctrica y venderla a domicilio. Así mismo, se constituyó la sociedad de Empresa Eléctrica de Guatemala.

La generación, transporte y distribución se hacía de forma aislada para distintas regiones del país. Es el caso de la Empresa Eléctrica del Sur, Empresa de Alumbrado Eléctrico del Norte y la Empresa Eléctrica de Escuintla.

En el año de 1925 la Empresa Eléctrica de Guatemala dio inicio a la construcción de su sede, la cual hasta la actualidad se encuentra en la 6ª avenida y 8ª calle, zona 1 de la ciudad de Guatemala.

Existen distintas modalidades de concentrar las actividades que se realizan e integran los sistemas eléctricos de potencia, los cuales derivan de la evolución, estadio político y económico de las regiones en las que estos se encuentran instalados. Se puede decir que existen dos formas de administrar e integrar las actividades que se realizan mediante los sistemas eléctricos de potencia desde el punto de vista técnico y económico, las cuales se conocen como integración vertical y horizontal.

1.2.1. Integración de las actividades

En un sistema eléctrico de potencia, a la generación, transporte, distribución y comercialización de los productos de la energía eléctrica se les puede denominar como actividades; las mismas, dependiendo de la forma en que estén integrados los sistemas, pueden ser desarrolladas por una sola entidad o varias.

1.2.1.1. Integración vertical

La integración vertical de las actividades que se realizan en un sistema eléctrico de potencia se refiere a la estructura en la que una misma entidad genera, transporta, distribuye y comercializa los productos asociados a la energía eléctrica. Esta generalmente ocurre cuando el Estado es quien administra el sistema o servicio de energía eléctrica.

1.2.1.2. Integración horizontal

La integración horizontal de las actividades que se realizan en un sistema eléctrico de potencia se refiere a la estructura en la que varias entidades participan desarrollando exclusivamente una de las actividades, ya sea generación, transporte, distribución o comercialización de energía eléctrica. Dentro de estas actividades existe competencia, lo cual reduce los precios de los servicios que ofrecen.

1.3. Abastecimiento de la demanda

Se entiende como abastecer la demanda de energía eléctrica a la acción coordinada y continua de generar y transportar la cantidad de energía necesaria

hasta los centros de consumo, bajo los estándares de calidad y seguridad operativa que dictan las mejores prácticas de la ingeniería y las leyes específicas de los países en los que se encuentran emplazados los sistemas eléctricos de potencia. Esta actividad está a cargo de entidades especializadas denominadas operadores de sistema.

1.3.1. Producción de energía eléctrica

Es el primer eslabón en la cadena para el abastecimiento de la demanda de energía eléctrica y consiste en todos los generadores que se encuentren conectados al sistema eléctrico de potencia y disponibles para su despacho.

Al conjunto de generadores emplazados en un mismo punto de conexión se le conoce como central de generación. Dependiendo de la tecnología que utilicen se les clasifica como:

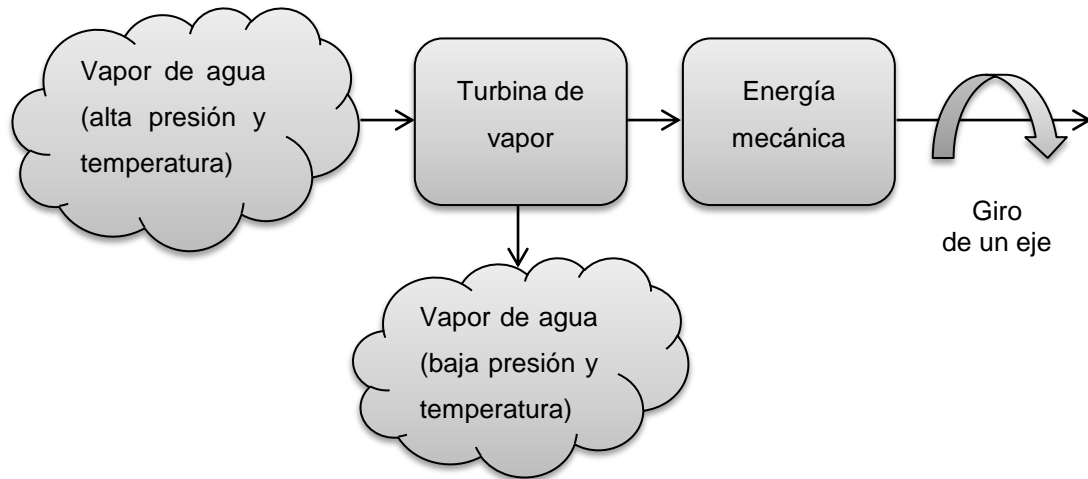
1.3.1.1. Centrales termoeléctricas

Son aquellas que mediante procesos térmicos transforman los recursos energéticos primarios para el aprovechamiento de la energía cinética, la transforman en movimiento giratorio para posteriormente, mediante generadores, convertirlo, en energía eléctrica.

Entre las tecnologías clasificadas como termoeléctricas se encuentran las turbinas de vapor, motores de combustión y turbinas de gas.

A continuación se ejemplifican los procesos de conversión de energía provenientes de recursos primarios en energía mecánica, para finalmente ser convertidos en energía eléctrica.

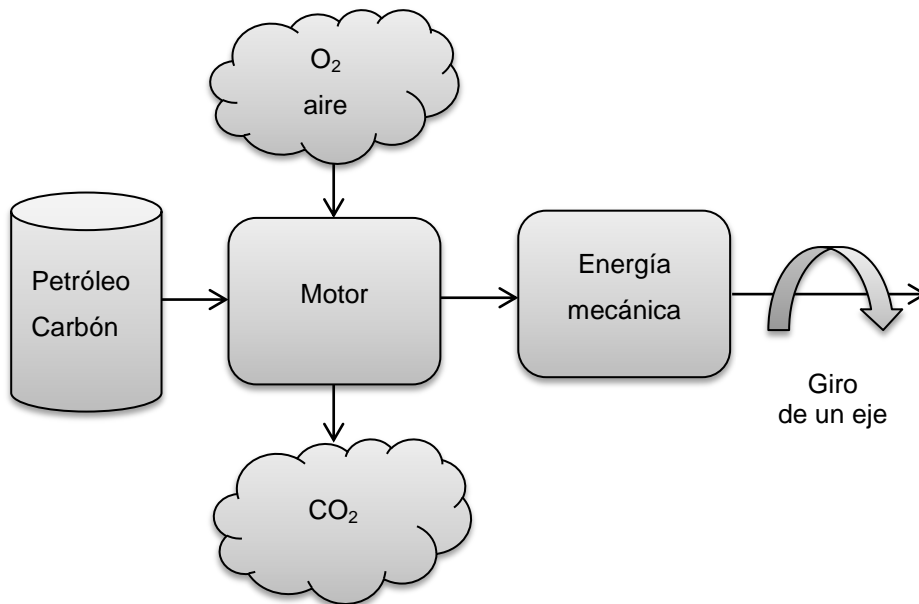
Figura 5. **Proceso de conversión turbina de vapor**



Fuente: elaboración propia.

Las turbinas de vapor, generalmente son propulsadas por calderas, las cuales utilizan el poder calorífico de un combustible para elevar la temperatura y cambiar de estado un fluido, generalmente agua, pasando de líquido a gaseoso, y así posteriormente por diferenciales de presión hacer rotar la referida turbina la cual se encuentra acoplada al generador eléctrico.

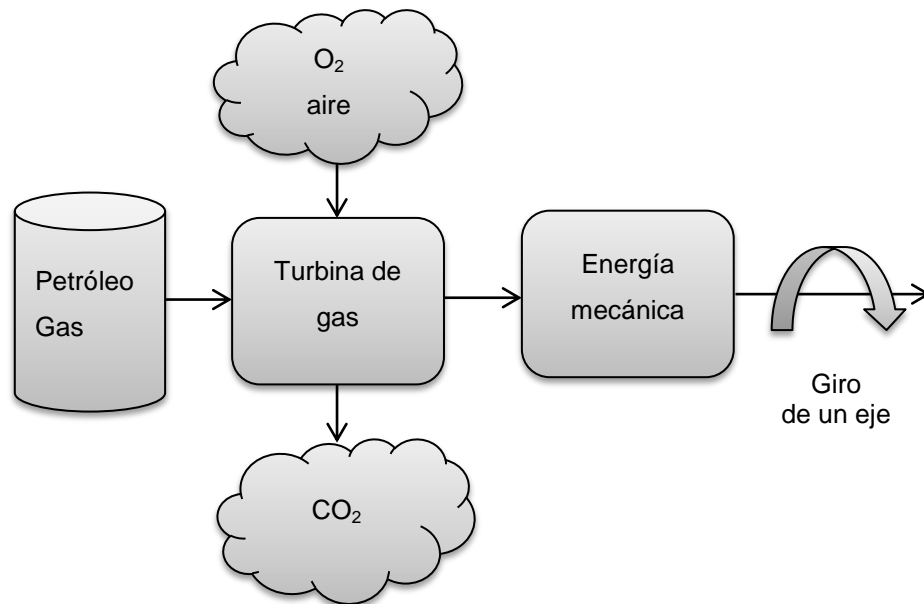
Figura 6. **Proceso de conversión motor**



Fuente: elaboración propia.

Los motores de combustión interna utilizan la energía creada por la combustión de uno o varios combustibles. Estos crean una explosión controlada dentro de uno o varios cilindros para posteriormente mover los pistones, los cuales se encuentran sujetos al cigüeñal mismo que transforma el movimiento rectilíneo en movimiento giratorio y para acoplarlo al generador eléctrico.

Figura 7. **Proceso de conversión turbina de gas**



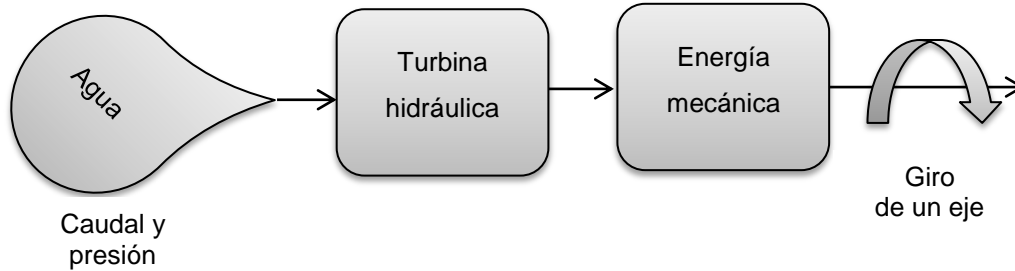
Fuente: elaboración propia.

La operación de las turbinas de gas es similar a las de vapor, solo que el fluido a utilizar es un gas. El intercambio de gases es con la atmósfera circundante a la turbina y el movimiento del mismo dentro de la turbina se realiza mediante diferenciales de temperatura.

1.3.1.2. **Centrales hidroeléctricas**

Son aquellas que aprovechan la energía cinética del agua, transformándola en movimiento giratorio para posteriormente, mediante generadores, convertirlo en energía eléctrica.

Figura 8. **Generador hidroeléctrico**



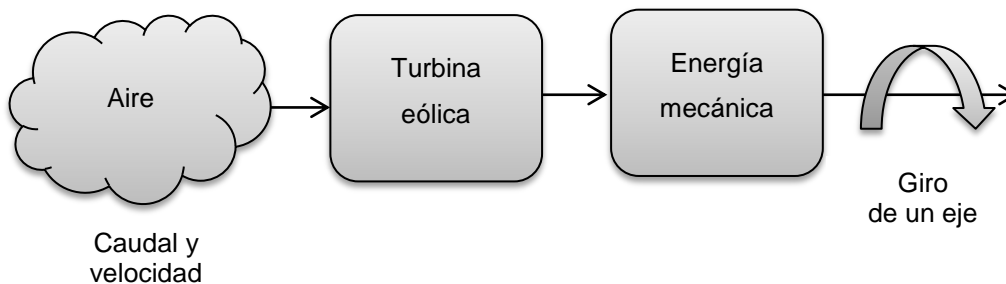
Fuente: elaboración propia.

1.3.1.3. **Centrales renovables intermitentes**

Son aquellas que utilizan fuentes de energía renovable tales como el viento o la proveniente de la luz solar. Por su naturaleza, no se tiene control del recurso energético primario, lo que hace que la operación de estas centrales sea intermitente. Entre ellas se encuentra las celdas fotovoltaicas y las turbinas eólicas.

A continuación, se ejemplifica con un diagrama el proceso de conversión energético de una turbina eólica:

Figura 9. **Conversión energético de una turbina eólica**



Fuente: elaboración propia.

1.3.2. Transporte de energía eléctrica

Es necesario llevar la energía eléctrica desde donde se produce hasta donde se consume; esta tarea se realiza mediante un medio físico denominado conductores. Generalmente, las centrales se encuentran alejadas de los puntos de consumo, por lo que los conductores llevan de un punto a otro la energía eléctrica. Estos pueden tener longitudes de varios kilómetros.

Esta actividad está a cargo de entidades especializadas denominadas transportistas, las cuales, basándose en los requerimientos del sistema eléctrico de potencia y las previsiones del crecimiento del mismo, diseñan líneas de transmisión (con criterios de ingeniería eléctrica, mecánica y civil) para brindar medios de transporte eficientes que reduzcan las pérdidas de energía que produce el transporte desde las centrales existentes hasta los centros de consumo. También, proveen puntos de conexión más cercanos a los proyectos futuros de generación.

Al ser los conductores el medio físico mediante el cual se transporta la energía, una fracción de la energía se transforma en calor (efecto Joule) por el fenómeno físico asociado al movimiento de electrones a través de él. Este efecto está ligado estrechamente con la magnitud de la corriente, por lo que, los transportistas utilizan altos niveles de voltaje para transmitir bajas corrientes.

1.3.2.1. Niveles de tensión

En Guatemala, los niveles de tensión asociados a instalaciones de transporte son de:

- Cuatrocientos mil voltios (400 kV).

- Doscientos treinta mil voltios (230 kV).
- Ciento treinta y ocho mil voltios (138 kV).
- Sesenta y nueve mil voltios (69 kV).

1.3.3. Distribución de energía eléctrica

Es la actividad que desempeñan entidades especializadas, concesionadas y que están de cara al usuario final de la energía eléctrica. Mediante redes de baja tensión distribuyen energía eléctrica para sus usos finales.

1.3.3.1. Niveles de tensión

- Treinta y cuatro mil ochocientos voltios (34,8 kV).
- Trece mil ochocientos voltios (13,8 kV).

1.3.4. Consumo de energía eléctrica

El consumo de energía eléctrica se refiere a la acción de convertir la energía eléctrica en cualquier otra forma de energía (mecánica, térmica, entre otros) mediante máquinas diseñadas para tal fin, tales como motores, refrigeradores, lámparas, entre otros.

En Guatemala el 60 % del consumo de energía eléctrica corresponde a aplicaciones domésticas; el resto, a cargas industriales.

1.3.4.1. Usuarios

Se denomina usuario de energía eléctrica a aquellos que utilizan dicha energía para su transformación en otras formas de energía, ya sea de uso

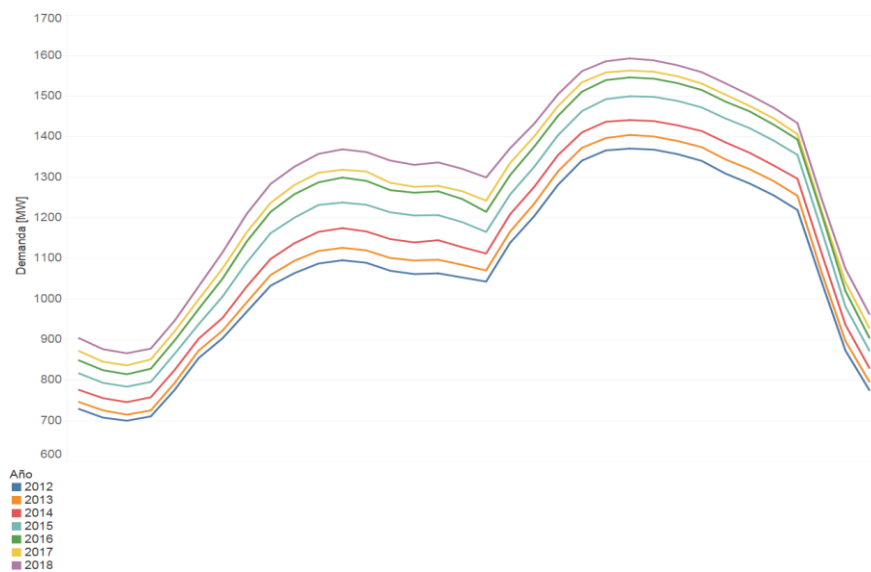
residencial o industrial. Su consumo puede ser medido en un punto de conexión a la red.

1.3.4.2. Demanda

El consumo de energía eléctrica de un país está estrechamente ligado con las actividades humanas y las actividades productivas que se desarrollen en él. Guatemala, al ser un país considerado en vías de desarrollo, posee un perfil de consumo de energía eléctrica en el que se incrementa significativamente la demanda durante las horas de la noche. Esto debido a que la mayor parte de la demanda está asociado al consumo residencial.

A continuación se muestra el perfil de carga típico de un día de la demanda nacional del sistema eléctrico de Guatemala para los años 2012 al 2018.

Figura 10. **Curva típica de demanda de energía eléctrica de Guatemala**



Fuente: elaboración propia con datos de los informes de posdespacho publicados por el AMM.

Como se puede observar, existen varios niveles de demanda nacional en el sistema eléctrico guatemalteco, los cuales para los periodos graficados, alcanzan valores de 700 MW hasta 1 700 MW. Por lo tanto, con fines de agrupar las horas en las que los niveles de carga son similares, la regulación del país indica que estas se agrupan en tres (3) bandas horarias, las cuales son:

1.3.4.2.1. Banda de valle

Las horas que corresponden a la banda de valle son las que se detallan en la tabla I y corresponden al periodo de demanda mínima. Durante estas horas es donde característicamente ocurren los niveles de demanda más bajos, debido a que las actividades humanas durante estas horas disminuyen.

1.3.4.2.2. Banda intermedia

Las horas que corresponden a la banda intermedia son las que se detallan en la tabla I y corresponden al periodo de demanda media. Durante estas horas ocurren demandas que típicamente son inferiores a las que ocurren en el periodo de punta, pero por el crecimiento de las relaciones comerciales entre Guatemala y los países vecinos, es en esta banda en donde se exporta energía hacia los referidos países. Los niveles de demanda son casi iguales a los de la banda de punta.

1.3.4.2.3. Banda de punta

Las horas que corresponden a la banda de punta son las que se detallan en la tabla I y corresponden al periodo de demanda máxima. Durante estas horas el sistema es sometido a su máximo estrés.

Tabla I. **Bandas horarias**

Banda	Período
Banda de punta	18 a 22 horas
Banda intermedia	06 a 18 horas
Banda de valle	22 a 06 horas

Fuente: elaboración propia considerando lo establecido en el Reglamento del Administrador del mercado mayorista.

1.3.4.3. Demanda total

Como se mencionó, el fin de los sistemas eléctricos de potencia es el de abastecer los requerimientos de energía eléctrica de los usuarios. Sin embargo, las actividades que se realizan para desarrollar tal tarea utilizan energía para su funcionamiento; por lo tanto, no solo se genera energía para abastecer la demanda de los usuarios sino también energía para que el sistema funcione.

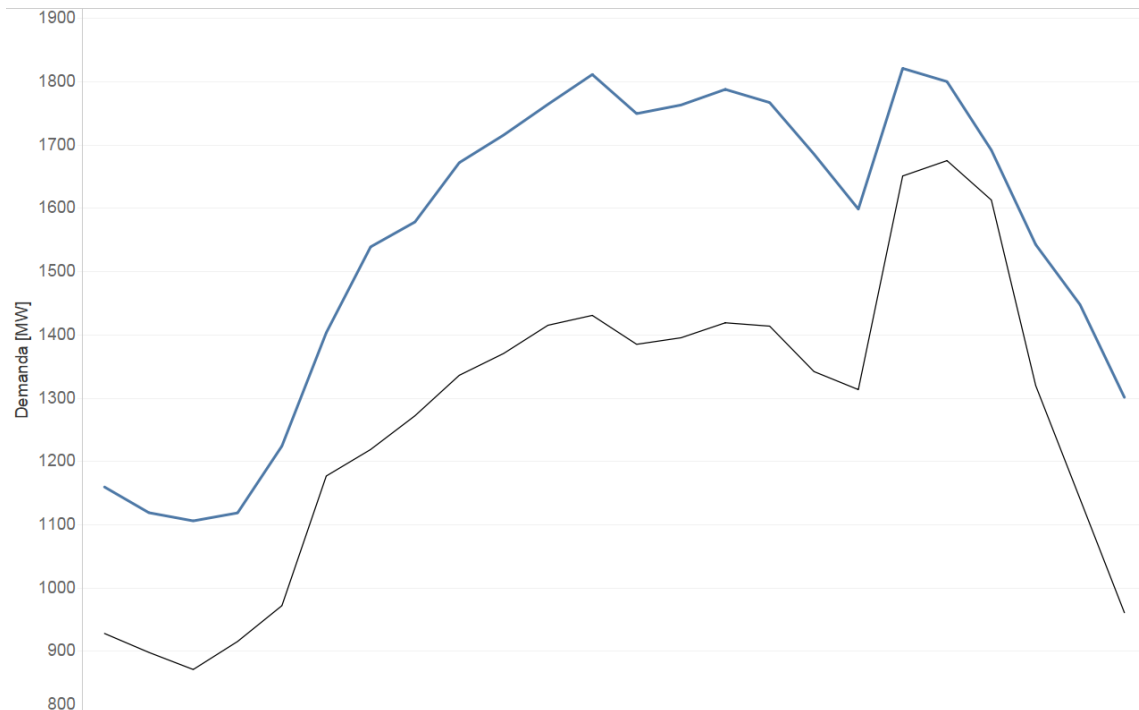
Tal es el caso de las líneas de transmisión, en las cuales una porción de la energía eléctrica producida, debido al movimiento caótico de los electrones que transportan, es transformada en energía térmica. A dicho fenómeno se le conoce como efecto Joule, en honor al físico inglés James Prescott Joule.

Por otra parte y sumado a la demanda nacional y pérdidas por efecto Joule, está la demanda asociada a la actividad de exportación, misma que es resultado de la expansión de los sistemas eléctricos de potencia de los países y las interconexiones que existen entre ellos. En algunos sistemas regionales (un sistema regional es la interconexión eléctrica de los sistemas eléctricos de potencia de países fronterizos) se dan intercambios de energía por las relaciones comerciales que existen entre los países. Tal es el caso de

Guatemala, que cuenta con acuerdos de interconexión y mercado de energía con la región centroamericana y México.

En el siguiente gráfico se puede observar el comportamiento de un día típico de la demanda nacional (es consistente en forma con las gráficas que se muestran en la figura 5). Adicionalmente se muestra la demanda total, la cual está compuesta por la demanda nacional, las pérdidas del sistema de transmisión y las exportaciones hacia los países vecinos (Centro América y México).

Figura 11. **Demanda nacional y demanda total**



Fuente: elaboración propia, empleando datos de los informes de posdespacho publicados por el AMM.

Si se observa la curva de demanda total se puede apreciar que en las horas que corresponden a la demanda media, ocurren demandas similares a las que ocurren en la demanda máxima. Lo anterior es consecuencia de los cobros asociados a hacer transacciones durante la demanda máxima; por lo tanto, los exportadores de energía prefieren realizar dichas transacciones fuera de esta banda. Esto es beneficioso, ya que se utiliza la infraestructura eléctrica del sistema de forma uniforme.

1.4. Situación del sistema nacional interconectado

El sistema nacional interconectado guatemalteco ha evolucionado gracias a los planes de expansión de la generación y transmisión. Estos han sido desarrollados previendo el crecimiento de la demanda, por lo que al instalar centrales de generación más eficientes y líneas de transmisión que forman un sistema mallado, se reducen los costos de producción de la energía y las pérdidas por transportarla.

A pesar de los esfuerzos realizados para el incremento de la capacidad de transporte y generación, un indicador que denota la forma en la que se utilizan las instalaciones de un sistema eléctrico de potencia de forma más eficiente es el factor de carga, ya que muestra mediante una razón la forma en la que se consume energía en el país.

$$f_{carga} = \frac{\sum_{n=1}^{n+1} D_n}{D_{max}} \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde:

- f_{carga} = Factor de carga
- D_n = Demanda de energía eléctrica de la hora n [MW]

- D_{max} = Demanda máxima del período en evaluación [MW]

En la siguiente tabla se muestra el comportamiento histórico del factor de carga mensual del sistema nacional interconectado.

Tabla II. Factor de carga

Mes	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Enero	65,16 %	66,32 %	65,56 %	67,89 %	67,20 %	68,86 %	71,25 %
Febrero	66,73 %	66,70 %	67,57 %	63,30 %	68,94 %	71,67 %	72,07 %
Marzo	68,23 %	63,76 %	68,30 %	71,25 %	69,22 %	71,99 %	70,46 %
Abril	64,63 %	68,44 %	67,39 %	68,58 %	71,55 %	69,25 %	72,46 %
Mayo	68,20 %	67,30 %	69,32 %	72,31 %	71,49 %	75,96 %	73,65 %
Junio	68,16 %	67,80 %	69,36 %	71,26 %	71,64 %	72,88 %	75,00 %
Julio	67,79 %	67,71 %	68,76 %	76,62 %	70,66 %	74,93 %	73,40 %
Agosto	69,05 %	67,72 %	67,90 %	77,87 %	71,25 %	74,93 %	73,65 %
Septiembre	66,79 %	68,20 %	65,65 %	77,07 %	71,70 %	73,06 %	73,94 %
Octubre	67,85 %	69,02 %	68,60 %	69,04 %	70,80 %	74,96 %	72,97 %
Noviembre	66,20 %	66,20 %	65,41 %	69,65 %	70,25 %	70,25 %	72,49 %
Diciembre	65,85 %	66,20 %	66,81 %	67,48 %	69,41 %	71,07 %	69,26 %

Fuente: elaboración propia, empleando la información consignada en los archivos adjuntos de los Informes de Transacciones Económicas.

El factor de carga del sistema ha crecido, debido al incremento en el consumo de energía eléctrica fuera de los períodos de demanda máxima. Esto se puede interpretar como un aplanamiento de la curva de carga del sistema, lo que sugiere un uso más eficiente de las instalaciones de transmisión y generación.

1.4.1. Matriz de generación y capacidad instalada

Al existir distintos tipos de tecnologías para la transformación de recursos primarios de energía en energía eléctrica, la decisión de instalar determinada tecnología responde a criterios técnicos y económicos; entonces, al instalar centrales de determinada tecnología, se deben considerar los requerimientos del sistema. Por ejemplo, para curvas de carga como las de Guatemala, en la que existen incrementos pronunciados de demanda de energía eléctrica en periodos cortos de tiempo, es necesario contar con unidades generadoras de respuesta rápida, como los motores de combustión interna, turbinas de gas o turbinas hidráulicas. No obstante, la operación de estas centrales por el combustible que utilizan (a excepción de las turbinas hidráulicas) tiene un costo alto, por lo tanto; y desde la perspectiva de la planificación de los sistemas de generación, se considera la incorporación de centrales de base. Tal es el caso de las turbinas de vapor, que se caracterizan por operar en régimen permanente durante largos períodos de tiempo; sin embargo, su capacidad de incrementar o reducir generación es lenta, lo que hace complementario el hecho de que se instalen centrales como las turbinas de gas, los motores de combustión interna o turbinas hidráulicas.

La variedad de tecnologías instaladas para la generación de energía eléctrica conforma la composición de la matriz de generación.

Por otra parte, dicha matriz de generación debe contar con la cantidad de potencia instalada suficiente para abastecer los requerimientos de la demanda, independientemente de las tecnologías: a este concepto se le denomina capacidad instalada. Guatemala, al año 2018 contaba con alrededor de 4 080,00 MW de capacidad instalada. A continuación se muestra la cantidad de potencia instalada por tecnología:

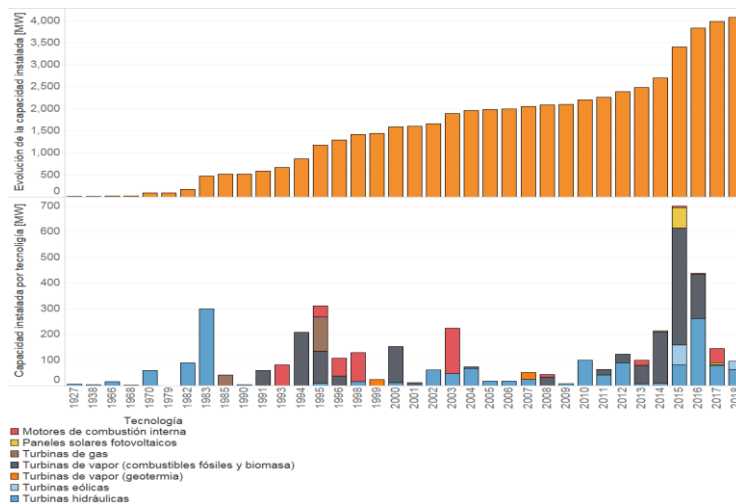
Tabla III. **Capacidad instalada al 2018 por tecnología**

Tecnología	Potencia instalada [MW]
Turbinas eólicas	107,4
Turbinas de vapor (geotermia)	49,2
Turbinas hidráulicas	1 501,8
Motores de combustión interna	580,9
Paneles solares fotovoltaicos	92,5
Turbina de gas	172,9
Turbina de vapor (combustibles fósiles y biomasa)	1 575,3
Total	4 079,9

Fuente: elaboración propia, empleando datos de los informes de capacidad instalada publicados por el AMM.

En el siguiente gráfico se observa la evolución cronológica de la capacidad instalada del parque generador de Guatemala y la diversidad de tecnologías que se han instalado y componen la matriz de generación.

Figura 12. **Evolución de la capacidad instalada**



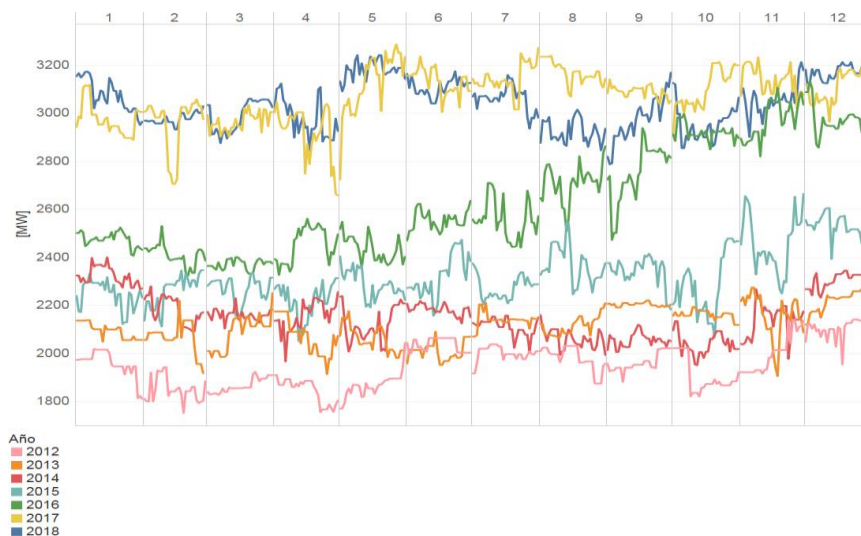
Fuente: elaboración propia, empleando datos de los informes de capacidad instalada publicados por el AMM.

Como se puede observar, la capacidad instalada y diversidad de tecnologías instaladas en Guatemala ha crecido significativamente. Así mismo, se observa también que las inversiones y diversificación de la matriz han sido realizadas durante etapas que se corresponden con los estadios políticos y económicos del país. El último es el que corresponde a los procesos de licitación abierta de los planes de expansión de la generación.

No obstante, la capacidad efectiva disponible para el despacho depende de la disponibilidad de los recursos; por lo tanto, el valor total de potencia disponible varía a lo largo de los meses del año.

A continuación se muestra un gráfico en el que se observa la estacionalidad y crecimiento de la potencia efectivamente disponible para los años comprendidos entre el 2012 y el 2018.

Figura 13. **Potencia disponible (2012 - 2018)**



Fuente: elaboración propia, empleando datos de los informes de programación diaria publicados por el AMM.

Se observa que la potencia disponible, a diferencia del valor total de capacidad instalada, varía a lo largo de los meses. Lo anterior es consecuencia de:

- La disponibilidad de recursos naturales o combustibles.
- Mantenimientos mayores de las centrales (preventivos).
- Indisponibilidades forzadas, por falla o mantenimiento correctivo.
- Causas no atribuibles a los generadores.

1.4.2. Combustibles

En Guatemala, los combustibles o fuentes primarias de energía que se utilizan para la generación de energía eléctrica se pueden clasificar como renovables y no renovables. El concepto de que un combustible o fuente primaria de energía sea renovable o no deriva de la capacidad de regeneración del mismo.

A continuación se lista los combustibles que utilizaban las tecnologías instaladas en el país para la generación de energía eléctrica al año 2018:

Tabla IV. **Combustibles**

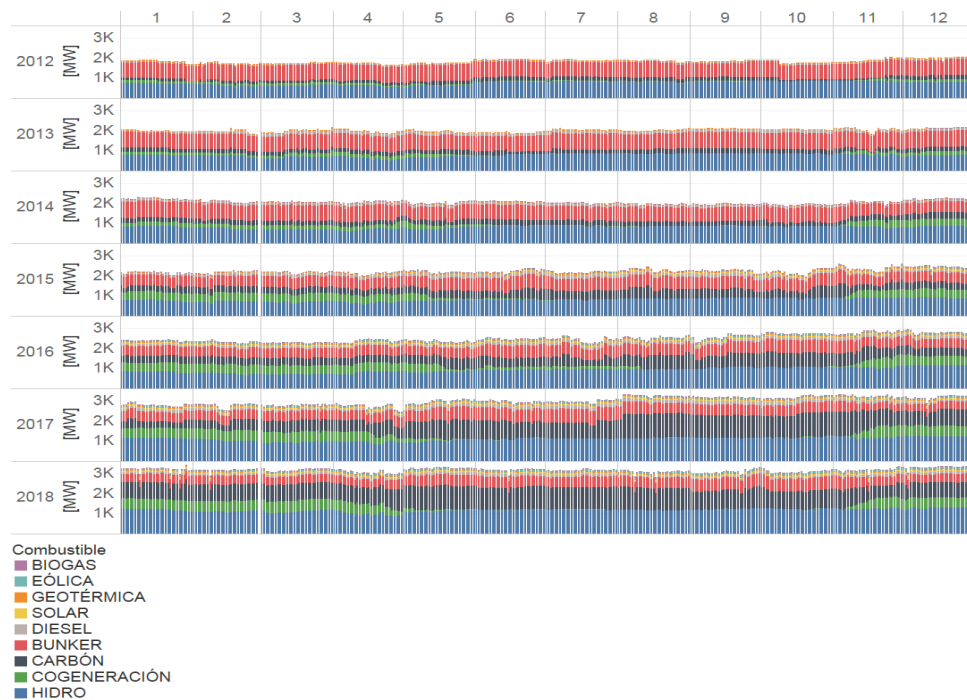
Combustible	Tipo de recurso
Diésel	No renovable
Bunker	No renovable
Carbón	No renovable
Biomasa	Renovable
Gas geotérmico	Renovable
Recurso hidráulico	Renovable
Luz solar	Renovable
Viento	Renovable

Fuente: elaboración propia.

En Guatemala no se producen combustibles derivados de petróleo para la generación de energía eléctrica; estos son importados, lo que implica una correcta gestión en la compra y aprovisionamiento de los mismos para mantener la disponibilidad de las centrales para el abastecimiento de la demanda al ser requerido. Así mismo, los combustibles fósiles tienen un costo, el cual debe ser trasladado al costo unitario de producción de energía, los cuales se conocen como costos variables de generación.

A continuación se muestra un gráfico en el que se observa la disponibilidad de potencia, clasificada por el tipo de combustible que se utiliza para la generación de energía eléctrica desde el año 2012 al 2018.

Figura 14. Potencia disponible por combustible



Fuente: elaboración propia, empleando datos de los informes de posdepacho publicados por el AMM.

1.5. Funcionamiento de los sistemas eléctricos de potencia

Para entender el funcionamiento de los sistemas eléctricos de potencia es necesario conocer los principios básicos de la transformación de la energía en energía eléctrica. El fenómeno electromagnético es la base del fenómeno de transformación energética. A continuación, y de forma resumida, se hará una descripción cualitativa del ya referido fenómeno, por lo que se iniciará con la inducción electromagnética.

El fenómeno electromagnético de la inducción se refiere a que se puede inducir (o crear) una fuerza electromotriz en un elemento conductor, si existe un campo magnético (en el cual se encuentra inmerso el conductor) que varía en el tiempo, ya sea en magnitud o ángulo respecto al conductor en donde deseamos se induzca una fuerza electromotriz, o incluso al cambiar la forma el conductor dentro del campo magnético o moverlo dentro del mismo.

La siguiente ecuación enuncia el fenómeno electromagnético de la inducción. Esta ecuación forma parte de las ecuaciones de Maxwell y fue demostrada experimentalmente por Michael Faraday, en honor a quien se le conoce como Ley de inducción de Faraday.

$$F_{em} = -N \frac{d\Phi}{dt} \text{ (Ecuación 2)}$$

Donde:

- F_{em} = fuerza electromotriz
- N = número de espiras o vueltas que tiene un conductor que se encuentra sumergido
- Φ = flujo magnético

El fenómeno de la inducción, como ya se mencionó, es el principio de funcionamiento de los generadores y transformadores.

Por otra parte, el elemento que interconecta los generadores y transformadores es el conductor; es decir, las líneas de transporte. Estas transportan de un punto a otro la energía; esto es posible debido a la interacción de las magnitudes físicas interdependientes denominadas campo eléctrico, densidad de corriente eléctrica y resistividad (inverso de la conductividad). Estas se relacionan mediante la ecuación:

$$J = \sigma E \text{ (Ecuación 3)}$$

Donde:

- J = densidad de corriente eléctrica. Se expresa en amperios por unidad de área [A/m^2].
- σ = conductividad de un material. Se expresa en Siemens por unidad de longitud [S/m].
- E = campo eléctrico. Se expresa en voltios por unidad de longitud [V/m].

La ecuación anterior se puede interpretar como que la densidad de corriente en un punto de un conductor, será proporcional al campo eléctrico aplicado a través de él, en función de la conductividad del mismo.

Sin embargo, es necesario conocer la procedencia de las magnitudes mencionadas, las cuales provienen de principios eléctricos básicos tales como la fuerza electromotriz. Este fenómeno (voltaje) se explica como la influencia al

movimiento sobre las cargas eléctricas estáticas en un material. Analizado dicho fenómeno de forma macroscópica, se idealiza la partícula eléctrica (electrón) como un punto, y esta se observa en un marco de referencia inercial. Entonces se utiliza el concepto de relatividad, en donde un observador, dependiendo de su posición observa que una partícula puede (o no) poseer mayor energía potencial dependiendo su posición en el espacio.

Por lo tanto, la fuerza electromotriz es la energía potencial que posee una partícula eléctrica que se encuentra sometida a un campo eléctrico y que, por su diferencia de potencial referenciada a un punto, puede (o no) moverse. De dicho movimiento de partículas eléctricas se crea la corriente eléctrica y dependiendo de las características atómicas, intrínsecas de los materiales, estas se pueden mover con mayor o menor facilidad dentro del material (resistencia). El estado energético de las partículas eléctricas en movimiento no es natural y para llegar a dicho estado deben ser excitadas por una fuerza externa (fuerza electromotriz); como un fenómeno paralelo y coexistente se crea una fuerza magnetomotriz.

Así mismo, por el movimiento de los electrones dentro del conductor, se produce calentamiento en el material, transformado así de forma exotérmica la energía eléctrica en energía térmica. A este fenómeno se le denomina efecto Joule y se modela mediante la siguiente ecuación.

$$P = I^2R \text{ (Ecuación 4)}$$

Donde:

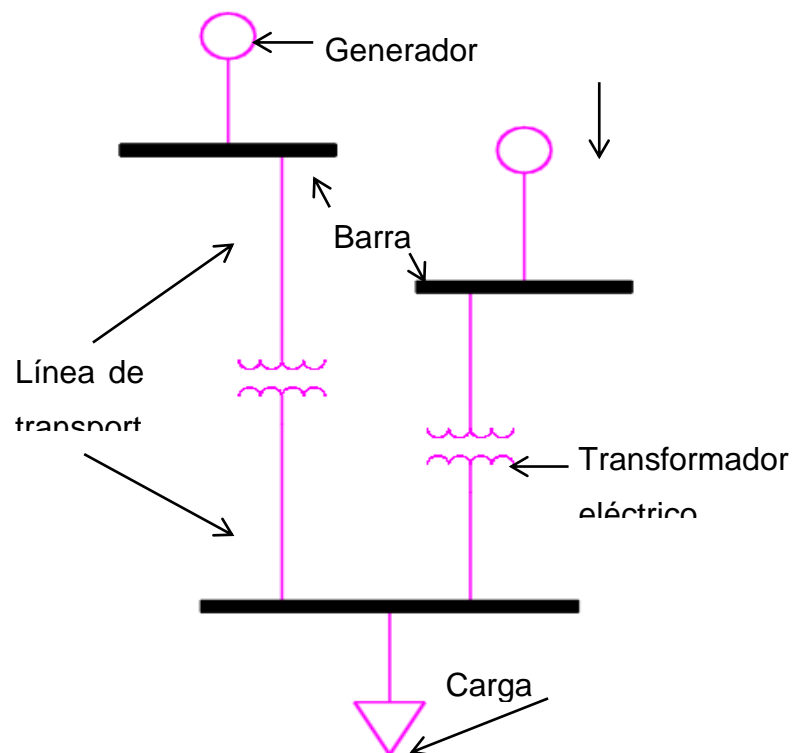
- P = potencia eléctrica disipada [watts]
- I = corriente eléctrica [Amperios]

- $R =$ resistencia eléctrica del material. [Ohm]

Una vez descritos los principios básicos que rigen el funcionamiento de los elementos que componen los sistemas eléctricos de potencia, podemos describir la disposición física y eléctrica de cada uno de sus componentes dentro del sistema y la ecuación que modela las pérdidas de energía.

A continuación se muestra una imagen donde se puede observar la conexión de los equipos para la conformación de un sistema eléctrico de potencia.

Figura 15. **Diagrama unifilar**



Fuente: elaboración propia.

Como se mencionó, los generadores son el primer eslabón en la cadena para el abastecimiento de la demanda. Estos se conectan mediante transformadores (elevadores de voltaje) a las líneas de transmisión, las que, a su vez, recorren grandes distancias y llegan a subestaciones de distribución. En estas, el voltaje se reduce y se distribuye la energía mediante redes de baja tensión hasta llegar a los usuarios de energía eléctrica.

1.6. Operación y despacho

La operación de los sistemas eléctricos de potencia está a cargo de entidades denominadas operadores de sistema. Estos poseen personal técnico especializado para la planificación de la operación en sus diferentes horizontes temporales, así como para la operación en tiempo real. Esta última la realizan a través de centros de control y monitoreo equipados con sistemas de control que permiten mantener la operación dentro de los niveles seguros.

El despacho de centrales se refiere a la programación de la operación considerando las instalaciones de generación, transformación, transporte, maniobra y protección disponibles en un horizonte de tiempo definido. Lo anterior con el fin de abastecer la demanda de energía eléctrica del sistema, considerando los criterios técnicos de calidad y seguridad operativa que establecen las mejores prácticas de la ingeniería y la regulación específica de cada país.

1.6.1. Principios del despacho

Al estar compuestos los referidos sistemas de varios elementos, el despacho debe considerar sus virtudes y limitaciones técnicas en la operación. Por ejemplo, como ya se mencionó, las centrales termoeléctricas que utilizan

turbinas de vapor poseen rampas de puesta en marcha y toma de carga superiores a las de las turbinas hidráulicas o los motores de combustión interna. Por lo tanto, el despacho deberá considerar dicha condición. Así mismo, los reservorios de agua (embalses) asociados a las centrales hidroeléctricas, dependiendo de su capacidad de regulación y las previsiones de aportes hidráulicos a los mismos, deberán ser utilizados con base en una política de uso del agua y las restricciones medio ambientales de la cuenca en la que se encuentran por usos del agua distintos a los de la generación de energía eléctrica.

De lo anterior se puede decir que el principio del despacho es la consideración de las restricciones técnicas y condiciones operativas conocidas de los equipos, para la programación de la operación para el abastecimiento de la demanda.

1.6.2. Despacho económico

El despacho económico se refiere a la programación de la operación de un sistema eléctrico de potencia, considerando las restricciones técnicas y condiciones operativas, con el criterio de eficiencia económica que permita abastecer la demanda al mínimo costo. Por lo tanto, la consideración de eficiencia económica determina que se deberá seguir una serie de instrucciones operativas y elegir la que resulte en un costo total menor respecto al resto de posibles escenarios para el abastecimiento de la demanda.

La generación de energía se prioriza considerando el costo asociado a la producción. Se entiende que se consideraran para el abastecimiento de la demanda, en un horizonte de tiempo determinado, el conjunto de centrales de menor costo que permita generar la energía eléctrica suficiente para garantizar

el abastecimiento de la demanda, cumpliendo con los criterios de calidad y seguridad operativa.

2. DESVIACIONES DE POTENCIA ACTIVA

Se considera que un generador se desvía respecto de lo programado cuando genera valores de potencia activa por encima o por debajo de lo que estaba previsto en el programa diario de despacho. De la misma manera se denomina parque generador hidroeléctrico al conjunto de centrales hidroeléctricas instaladas y conectadas a un sistema eléctrico de potencia.

$$D_{ij} = R_{ij} - P_{ij} \text{ (Ecuación 5)}$$

Donde:

- D = desviación MW
- R = potencia generada real MW
- P = potencia programada MW

2.1. Centrales hidroeléctricas

Al ser la inducción electromagnética la base fundamental para la generación de energía eléctrica, las centrales hidroeléctricas, al igual que cualquier otra tecnología para la generación de energía eléctrica (con excepción de la tecnología fotovoltaica) utilizan la energía cinética que puede proporcionar una fuente primaria de energía, que para el caso particular es la de las corrientes de agua.

2.1.1. Partes de una central hidroeléctrica

Las partes de una hidroeléctrica se pueden agrupar a partir de sus funciones. La literatura específica del diseño y operación de centrales hidroeléctricas las clasifica como:

2.1.1.1. Obra civil

Las obras civiles en general se componen de los elementos de retención, almacenamiento y conducción hidráulica, los cuales pueden ser:

2.1.1.1.1. Azud

Constituye un obstáculo al caudal del río y permite remansar el agua para desviar el caudal requerido por la central, dejando fluir por encima de él, el caudal no deseado.

2.1.1.1.2. Presa y embalse

Las presas retienen el agua y permiten estancarla, lo cual crea embalses. Su principal función es el control y dosificación (regulación) del agua para su aprovechamiento en el tiempo. Existen centrales que no poseen embalse, a las cuales se les reconoce como “filo de agua”.

2.1.1.1.3. Canal de conducción

Es la instalación que permite transportar el agua desde la presa hasta la cámara de carga, pasando por el desarenador. Los canales de conducción

están provistos de rejillas y compuertas que impiden el paso de elementos sólidos de gran tamaño e impiden el paso de agua cuando es necesario.

2.1.1.1.4. Desarenador

Tiene como función remover las partículas en suspensión que se encuentran en el agua, con el fin de no dejarlas pasar hacia la turbina, ya que podrían ocasionarle daños mecánicos.

2.1.1.1.5. Cámara de carga

Es la obra civil que se encuentra a la entrada de la tubería de presión. Permite regular el volumen de agua para mantener presión constante en la tubería de presión. Así mismo, permite almacenar el volumen de agua necesario para arrancar la turbina. Las funciones de la cámara de carga varían dependiendo del diseño de la central hidroeléctrica.

2.1.1.1.6. Tubería de presión

Es la instalación que crea la columna de agua que entra a la turbina, Durante su diseño se debe tener especial cuidado en no permitir que ingresen o tratar de reducir moléculas de oxígeno, ya que estas producen cavitación en la turbina.

2.1.1.1.7. Chimenea

La chimenea de equilibrio es una instalación anexa a la tubería de presión que permite regular la presión dentro de la tubería, tanto en operación normal como en condiciones de emergencia, para evitar el golpe de ariete.

2.1.1.1.8. Canal de descarga

También conocido como desfogue, es el último tramo de la obra civil de una central hidroeléctrica. Permite reencauzar el agua que ha sido turbinada al cauce natural del río.

Así mismo, las centrales hidroeléctricas poseen máquinas que le permiten a la central hidroeléctrica en su conjunto transformar el movimiento del agua en energía eléctrica. La turbina es la que realiza esta tarea, a continuación se describe dicha máquina y los tipos más usados en centrales hidroeléctricas.

2.1.1.2. Turbina hidráulica

Las turbinas son el medio que convierte la energía de la fuente primaria en movimiento mecánico. Son propulsadas por el agua y dependiendo del tipo de turbina, el agua puede o no ingresar de forma completa a la misma. Las turbinas, dependiendo del modo de propulsión que empleen, se conocen como de acción o reacción.

Las de acción son aquellas que se propulsan utilizando la energía cinética de la fuente de energía primaria de forma tangencial; no obstante, el rodete de la turbina no se encuentra inmerso en el fluido, Por otro lado, y a diferencia de las turbinas de acción, en las de reacción el rodete se encuentran inmerso en el fluido.

El tipo de propulsión de las turbinas define sus características de utilización, eficiencia, velocidad de giro y potencia mecánica de salida. A continuación se listan los tipos de turbina más utilizadas en el diseño de centrales hidroeléctricas.

2.1.1.3. Tipos de turbinas

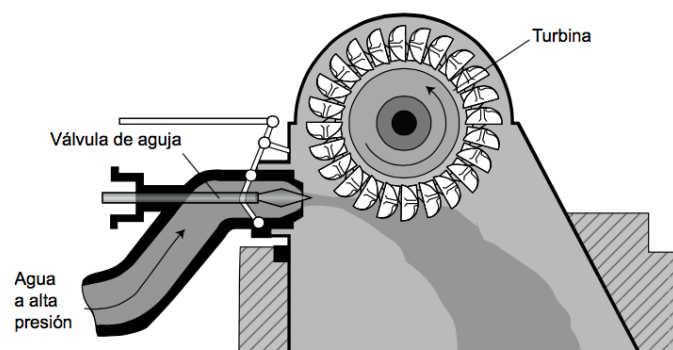
A continuación, se muestran los tipos de turbina existentes.

2.1.1.3.1. Turbina Pelton

Diseñada por el ingeniero estadounidense Lester Allen Pelton, esta turbina es de tipo acción, ya que su rodete no se encuentra inmerso en el caudal que ingresa, sino el agua es inyectada y hace girar el rodete. Este posee cucharones que al ser golpeados por el agua que ingresa a la turbina por los inyectores, se propulsa el movimiento.

A este tipo de turbinas se les conoce como de admisión parcial y se emplean en centrales hidroeléctricas que poseen grandes saltos, ya que es la fuerza con la que el agua que sale de los inyectores la que mueve el rodete y este, a su vez, mueve el generador de energía eléctrica.

Figura 16. Turbina Pelton

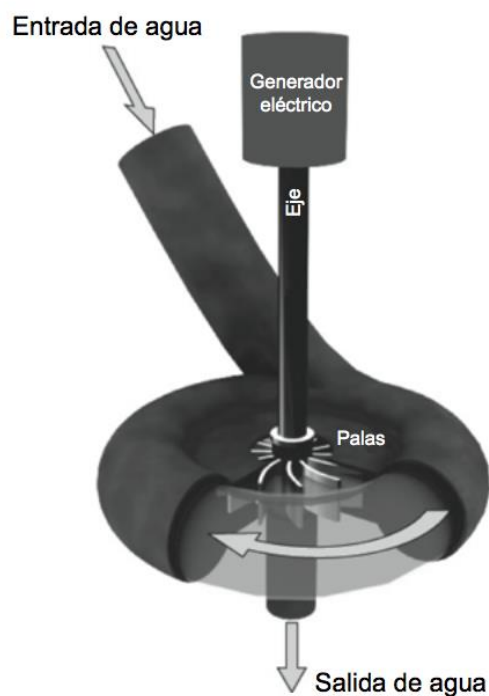


Fuente: CARTA GONZÁLEZ, José Antonio; CALERO PEREZ, Roque; COLMENAR SANTOS, Antonio y CASTRO GIL, Manuel Alonzo. *Centrales de energía (Generación eléctrica con energías renovables)*. p. 444.

2.1.1.3.2. Turbina Francis

Diseñada por el ingeniero de origen inglés James Bichens Francis, esta turbina es de tipo reacción, ya que su rodete se encuentra totalmente sumergido en el caudal que ingresa a la turbina. Una característica de este tipo de turbinas es que el agua cambia de dirección al pasar por la misma, ya que se aprovecha de forma tangencial al rodete y es expulsada de forma axial al mismo.

Figura 17. Turbina Francis



Fuente: CARTA GONZÁLEZ, José Antonio; CALERO PEREZ, Roque; COLMENAR SANTOS, Antonio y CASTRO GIL, Manuel Alonzo. *Centrales de energía (Generación eléctrica con energías renovables)*. p. 446.

A diferencia de las turbinas Pelton, las turbinas Francis pueden operar en un espectro de saltos muy variado pudiendo ser desde 2 m hasta 200 m.

2.1.1.3.3. Turbina Kaplan

Diseñada por el ingeniero austriaco Viktor Kaplan, al igual que la Francis, esta turbina es del tipo reacción, ya que la admisión del caudal es total. Es ideal para bajos caudales y pequeños saltos. En su diseño, esta turbina fue concebida con un propulsor de hélice. El diseño puede variar, dependiendo de las características de uso de la turbina.

2.1.1.4. Generador

Los generadores de energía eléctrica son las máquinas especializadas que convierten, mediante la inducción electromagnética, el movimiento de las turbinas en energía eléctrica. Como se mencionó, existen dos tipos de generadores: el generador síncrono y asíncrono; sin embargo, las centrales hidroeléctricas utilizan generadores síncronos.

Las centrales hidroeléctricas son una tecnología que utiliza la energía potencial del agua (embalsada o no) para la conversión en energía eléctrica. Todas sus partes juegan un papel importante en dicha tarea, desde las obras civiles hasta las electromecánicas. La selección del diseño de una central hidroeléctrica está sujeta a las características de la región en la que esta será instalada.

La operación de los generadores de las centrales hidroeléctricas, se encuentra asociada a la disponibilidad de agua, ya sea en centrales con embalse o de pasada (filo de agua). El diseño de la central debe permitir

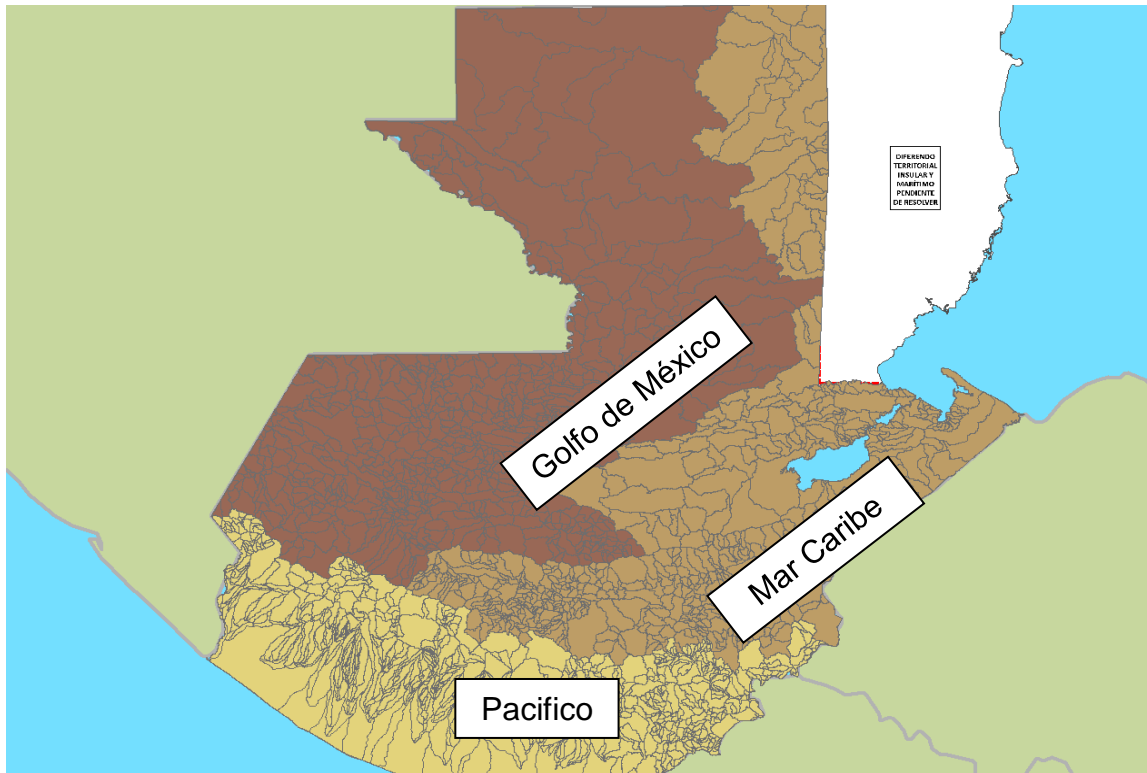
dinamizar el uso de la potencia durante las horas en las que sea requerida por el despacho económico, e incorpora las obras civiles, hidráulicas o electromecánicas necesarias para su correcta operación.

2.2. Regiones hidráulicas (vertientes)

El diccionario de la Real Academia Española define que una vertiente es el “declive o sitio por donde corre o puede correr el agua.”; entonces, la ubicación geográfica de una central hidroeléctrica dentro de una vertiente es de vital importancia para el diseño de la misma, ya que estas aprovechan la energía potencial mecánica que el declive del terreno proporciona al recurso hidráulico que corre por las ya referidas vertientes.

Guatemala cuenta con tres vertientes, la del Golfo de México, la vertiente del Mar Caribe y la del Pacífico. En el gráfico a continuación se muestra la distribución geográfica de las referidas vertientes.

Figura 18. **Vertientes en Guatemala**



Fuente: Atlas del Sistema Nacional de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica.

Como se mencionó, la ubicación geográfica de una central hidroeléctrica dentro de una vertiente es crucial para su diseño, tanto para seleccionar el tipo de turbina como la potencia a instalar. A continuación se muestran las centrales hidroeléctricas y su capacidad de placa, instaladas al año 2018, en las ya citadas vertientes de Guatemala:

Tabla V. **Centrales hidroeléctricas (Golfo de México)**

Vertiente del Golfo de México			
Nemotécnico	Nombre	Departamento	Capacidad [MW]
CHX-H	Chixoy	Alta Verapaz	300,0
MTZ-H	Matanzas	Baja Verapaz	12,0
PVI-H	Palo viejo	Quiché	85,0
RAA-H	Raaxha	Alta Verapaz	5,1
VDA-H	Vision de aguila	Alta Verapaz	2,1
XAC-H	Hidroxacbal	Quiché	94,0
XAD-H	Xacbal delta	Quiché	58,4
Total			556,6

Fuente: elaboración propia

En esta vertiente se encuentra instalada la central hidroeléctrica de mayor capacidad del país (Chixoy); así mismo se encuentran instaladas centrales como Xacbal y Xacbal Delta.

Tabla VI. **Centrales hidroeléctricas (Mar Caribe)**

Vertiente del Mar Caribe			
Nemotécnico	Nombre	Departamento	Capacidad [MW]
CAF-H	El cafetal	Baja Verapaz	8,6
CHO-H	Choloma	Alta Verapaz	9,7
CND-H	Candelaria	Alta Verapaz	4,6
HCV-H	Cerro vivo	Guatemala	2,4
HLP-H	La perla	Alta Verapaz	3,7
LVA-H	Las vacas	Guatemala	45,0
OX2-H	Oxec ii	Alta Verapaz	60,0
OXE-H	Oxec	Alta Verapaz	26,1
PAS-H	Pasabien	Zacapa	12,8
RBO-H	Rio bobos	Izabal	10,0
REN-H1	Renace	Alta Verapaz	68,1

Continuación de la tabla VI.

REN-H2	Renace ii	Alta Verapaz	114,8
REN-H3	Renace iii	Alta Verapaz	66,0
SEC-H	Secacao	Alta Verapaz	16,5
SIS-H	San isidro	Baja Verapaz	3,9
STS-H	Santa teresa	Baja Verapaz	17,0
		Total	469,2

Fuente: elaboración propia.

En esta vertiente se encuentran instaladas un gran número de centrales, como el proyecto hidroeléctrico río Las Vacas, que es el único que se encuentra en el departamento de Guatemala.

Tabla VII. **Centrales hidroeléctricas (Pacífico)**

Vertiente del Pacífico			
Nemotécnico	Nombre	Departamento	Capacidad [MW]
AGU-H	Aguacapa	Santa Rosa	90,0
CAN-H	Hidrocanada	Quezaltenango	48,1
CBN-H	El cóbano	Santa Rosa	11,0
FLO-H	Finca lorena	San Marcos	4,2
HAG-H	Hidroaguna	Escuintla	2,0
HCR-H	Coralito	Suchitepéquez	2,1
HEL-H	El libertador	Santa Rosa	2,0
HGY-H	Guayacán	Santa Rosa	2,9
HHS-H	Hidropower sdmm	Escuintla	2,2
HIX-H	Ixtalito	San Marcos	1,6
HKC-H	Kaplan chapina	Santa Rosa	2,0
HMA-H	Maxanal	Suchitepéquez	2,8
HPT-H	Los patos	San Marcos	5,0
HSM-H	El salto marinala	Escuintla	5,0
HST-H	Santa teresa	Sololá	2,2
HUV-H1	Las uvitas	Chimaltenango	1,9

Continuación de la tabla VII.

HXO-H	Xolhuitz	San Marcos	2,3
JUR-H	Jurun marinala	Escuintla	60,0
LES-H	Los esclavos	Santa Rosa	15,0
LFU-H	Las fuentes ii	Quetzaltenango	14,2
LIB-H	La libertad	Quetzaltenango	9,4
MNL-H3	El manantial 3	Retalhuleu	0,5
MNL-HG1	El manantial 1	Retalhuleu	3,8
MNL-HG21	El manantial 2	Retalhuleu	27,4
MTO-H	Montecristo	Quetzaltenango	13,5
PAL-H	Palin ii	Escuintla	5,8
PNA-H	Panan	Suchitepéquez	7,3
POR-H	El porvenir	San Marcos	2,3
PVE-H	Poza verde	Santa Rosa	12,5
RC2-H	El recreo 2	Retalhuleu	24,4
REC-H	El recreo	Quetzaltenango	26,0
SAL-H	El salto	Escuintla	4,0
SMA-H	Santa maria	Quezaltenango	6,0
		Total	419,4

Fuente: elaboración propia.

En esta vertiente se encuentran instaladas 33 centrales hidroeléctricas. La de mayor capacidad es la central denominada Aguacapa, seguido de Jurún Marinalá.

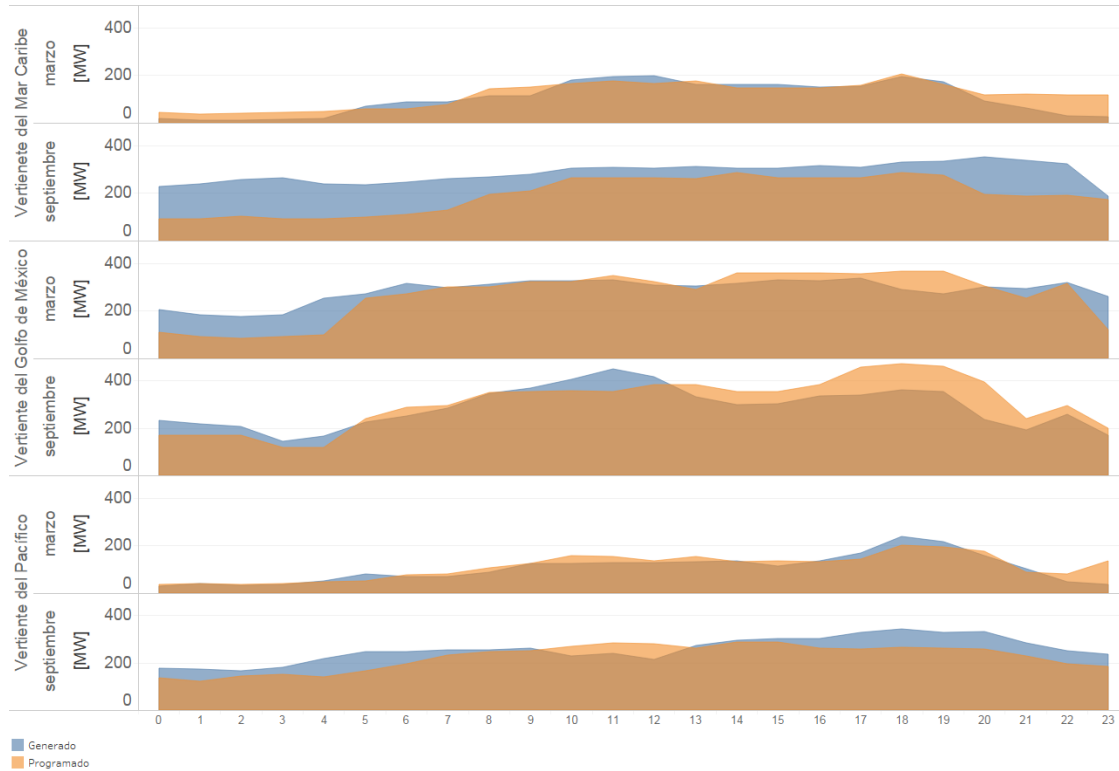
La repartición de la capacidad instalada por vertiente es homogénea, con erupción de un incremento considerable en la vertiente del Mar Caribe, debido a que en la misma se encuentra Chixoy.

2.3. Caracterización del estudio

El parque generador hidroeléctrico de Guatemala contaba con 56 centrales instaladas al año 2018, incluyendo las pequeñas y grandes centrales de esta tecnología; como ya se mencionó, el operador del sistema elabora y publica el programa diario de despacho, el cual constituye una serie de instrucciones operativas programadas que los operadores de las centrales deberán seguir, Sin embargo, durante la operación surgen desviaciones de potencia activa respecto de lo programado. En ese sentido, el presente estudio busca determinar las causas e impactos de las desviaciones de potencia activa del parque generador hidroeléctrico en el sistema eléctrico de potencia de Guatemala.

En el siguiente gráfico se muestra la comparación del perfil típico de generación programado y real del parque generador hidroeléctrico, por vertiente y mes (alta y baja producción). Se considerara que marzo corresponde a un mes típico de baja producción hidroeléctrica y septiembre corresponde a un mes de alta producción.

Figura 19. Diferencias programado y ejecutado



Fuente: elaboración propia, empleando datos de los informes de posdespacho y programación diaria publicados por el AMM.

Es evidente que la generación real difiere de lo programado para el conjunto de centrales instaladas en cada vertiente y para los meses de alta y baja producción. También es evidente que la cantidad de energía programada y producida varía dependiendo de la disponibilidad del recurso hidráulico, tal y como se mostró en la figura 14.

2.3.1. Desviaciones del parque generador

El operador del sistema es el encargado de optimizar los recursos disponibles para abastecer la demanda al mínimo costo; por lo tanto, como resultado de dicha optimización, el operador publica el programa de despacho, el cual constituye una instrucción programada y que los operadores de las centrales deberán seguir durante su periodo de vigencia. Sin embargo, por la naturaleza de los sistemas eléctricos de potencia, están propensos a sufrir contingencias no programadas, y como consecuencia, unidades generadores, líneas de transporte, transformadores, entre otros., quedan fuera de operación, limitando así la operación programada. En caso de que ocurra lo anterior la regulación nacional prevé la emisión de una reprogramación de la operación para respetar la premisa de operar el sistema al mínimo costo considerando los recursos ahora disponibles. Esta se emite posteriormente a haber restablecido las condiciones de operación normales y seguras del sistema eléctrico de potencia nacional; por lo tanto, el operador, con las condiciones restablecidas (dependiendo de la magnitud de la falla o contingencia), optimiza de nuevo los recursos disponibles y publica un nuevo programa de despacho.

A continuación, se detalla los cúsaes para la emisión de una nueva programación:

- La demanda de energía eléctrica real difiere de lo pronosticado.
- Por indisponibilidad de centrales que prestaban servicios complementarios.
- Por sobrecarga o posible sobrecarga de líneas de transmisión.

- Por incremento de caudales entrantes a las obras hidráulicas de las centrales hidroeléctricas, por lo que se despacha mayor energía para evitar vertimiento.
- Por disponibilidad de centrales o unidades que están indisponibles y que resultan económicas.
- Por modificación de los programas de intercambio en las interconexiones.

No obstante, y como se muestra en la figura 14, existen desviaciones respecto de lo programado que no son motivo de reprogramaciones. Tal es el caso de las desviaciones de potencia activa de centrales hidroeléctricas que generan energía eléctrica por encima o por debajo de lo programado.

La magnitud de las desviaciones de potencia activa depende de la capacidad instalada de las centrales y la disponibilidad del recurso hidráulico.

Las desviaciones de potencia activa ocurren a lo largo de las veinticuatro (24) horas del día. A continuación se muestra el comportamiento de las desviaciones del parque generador hidroeléctrico desde el año dos mil doce (2012) para los meses de alta y baja producción. Se consideró con fines del presente estudio, evaluar los meses de mayor y menor producción hidroeléctrica, los cuales corresponden a los que se muestran en la siguiente tabla.

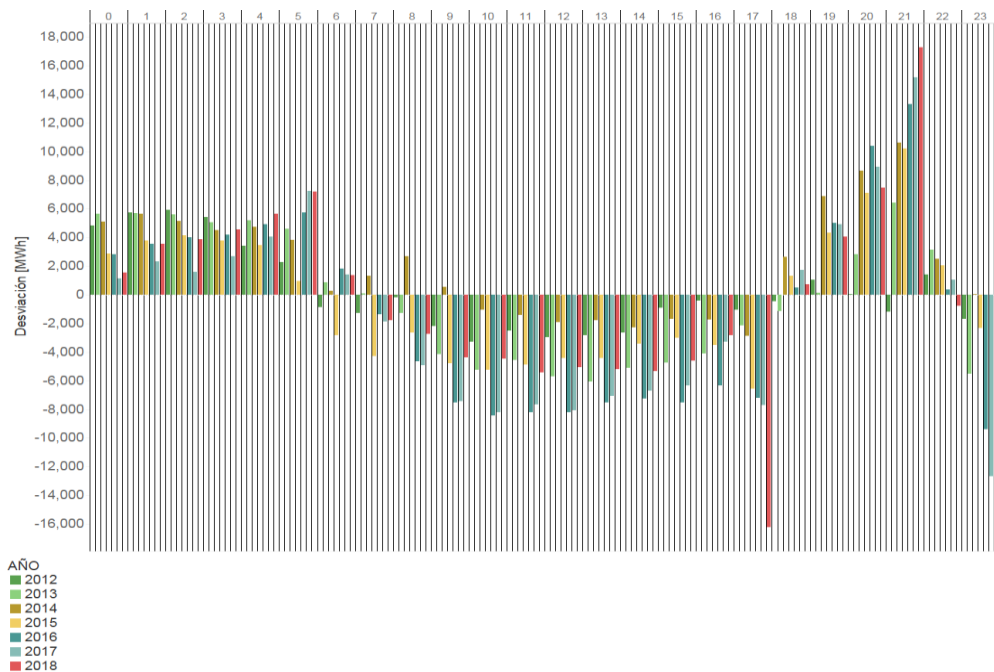
Tabla VIII. **Meses de alta y baja producción**

Mes	Categoría
Marzo	Baja producción hidroeléctrica
Septiembre	Alta producción hidroeléctrica

Fuente: elaboración propia

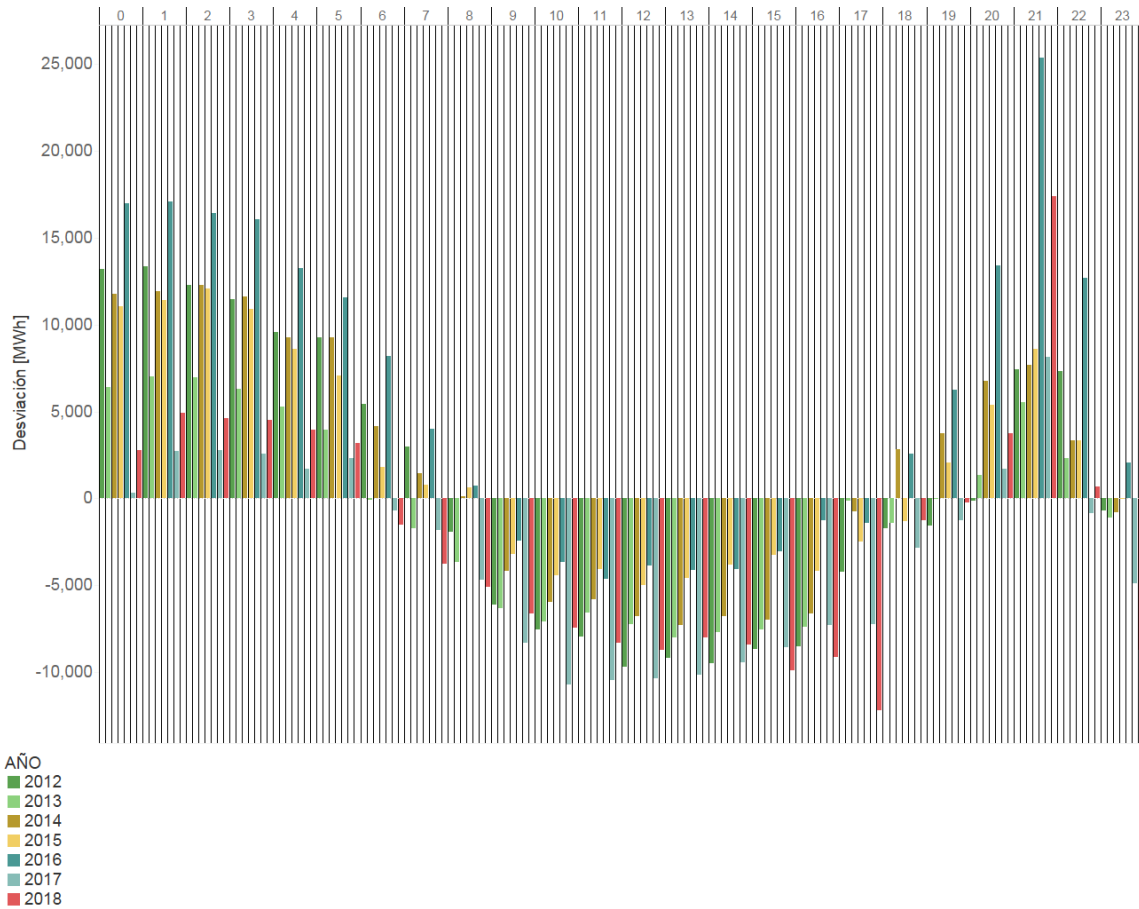
A continuación, en las figuras 15 y 16 se muestra el comportamiento de las desviaciones del parque generador hidroeléctrico para los meses de alta y baja producción de los años comprendidos entre el 2012 y 2018. Se puede observar que existe un comportamiento sistemático en la forma en la que se desvían las centrales hidroeléctricas.

Figura 20. **Comportamiento desviaciones (baja producción)**



Fuente: elaboración propia, empleando datos de los informes de posdespacho y programación diaria publicados por el AMM.

Figura 21. Comportamiento desviaciones (alta producción)



Fuente: elaboración propia, empleando datos de los informes de posdespacho y programación diaria publicados por el AMM.

Se observa que durante las bandas de demanda mínima y máxima, el parque generador hidroeléctrico en su conjunto se desvía por encima de lo programado, como consecuencia de los siguientes factores:

- Se incrementa la generación de las centrales hidroeléctricas para evitar el vertimiento.

- El precio de oportunidad de la energía de la banda máxima por lo general es superior al de las otras bandas; por lo tanto, es conveniente para los generadores hidráulicos vender mayor cantidad de energía durante este período, ya que será remunerado a precios más altos que el de las demás bandas.
- En la normativa guatemalteca existe un disuasivo para estar indisponible durante las horas de demanda máxima, ya que los generadores que no garanticen su potencia durante dicha banda, deberán pagar desvíos de potencia. Lo anterior no ocurre en otras bandas.

Por otra parte, se observa que el parque generador hidroeléctrico se desvía de forma negativa respecto lo programado durante la banda media. En ese sentido, el presente estudio busca determinar las posibles causas y efectos técnicos y económicos sobre el sistema eléctrico guatemalteco.

En concordancia con lo indicado anteriormente, a continuación se muestra el cálculo del comportamiento de las desviaciones horarias de potencia activa promedio del parque generador hidroeléctrico para los meses de alta y baja producción hidroeléctrica.

Tabla IX. **Desviaciones de potencia activa promedio**

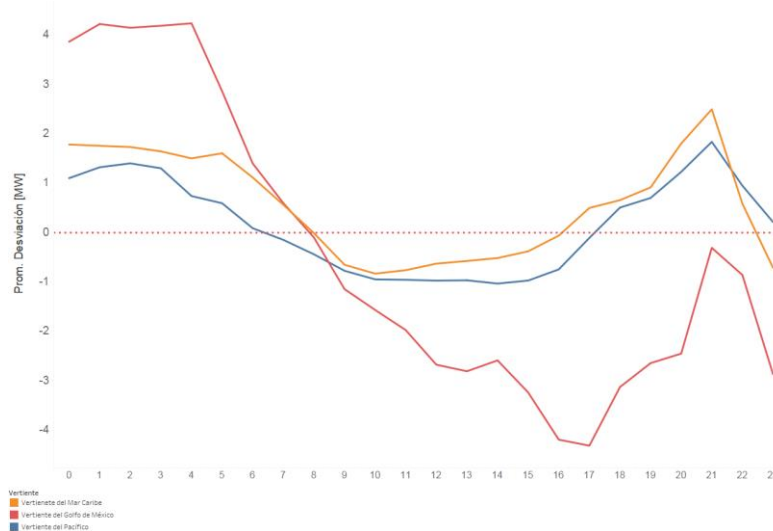
Vertiente (mes de alta producción)	Mínima [MW]	Media [MW]	Máxima [MW]
Vertiente del Mar Caribe	1,2356	-0,1888	1,4658
Vertiente del Golfo de México	2,4735	-1,8864	-2,1353
Vertiente del Pacífico	0,9513	-0,6668	1,0665

Fuente: elaboración propia.

El promedio de las desviaciones de potencia activa del parque generador hidroeléctrico que ocurren durante los meses de alta producción hidráulica muestran un comportamiento similar a que se muestra en la figura 16. El parque en su totalidad se desvía de forma positiva durante las bandas mínima y máxima, y de forma negativa durante la banda media, con excepción de la banda máxima para las centrales que se encuentran instaladas en la vertiente del Golfo de México. Lo anterior como consecuencia de que en dicha vertiente se encuentra instalada la central hidroeléctrica Chixoy la cual, como se mencionó, es la más grande del país y, en ocasiones, compensa los faltantes o excedentes de energía, por lo que su operación puede resultar en ocasiones por encima o por debajo de lo programado.

A continuación, en la figura 17 se muestra el comportamiento horario de las desviaciones promedio por vertiente.

Figura 22. Promedio desviaciones horarias (alta producción)



Fuente: elaboración propia, empleando datos de los informes de programación diaria y posdespacho publicados por el AMM

Así mismo, se muestran las desviaciones promedio diarias para los meses de baja producción del parque generador hidroeléctrico.

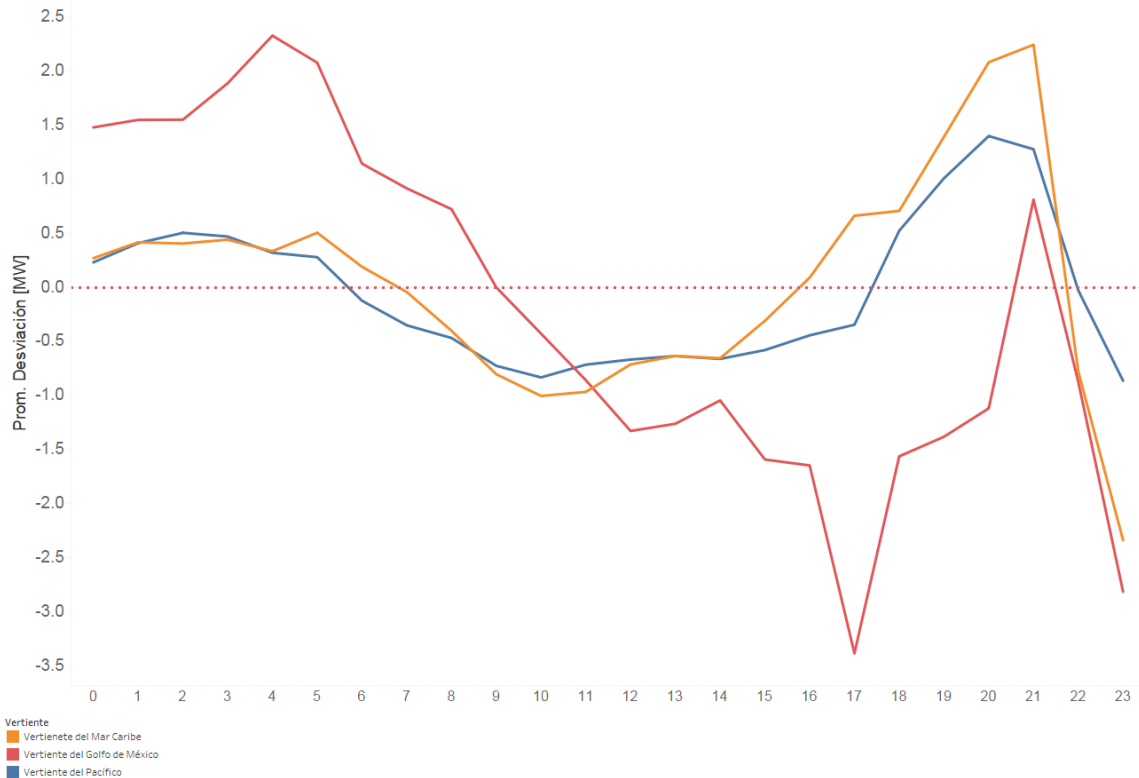
Tabla X. **Desviaciones de potencia activa promedio**

Vertiente (mes de baja producción)	Mínima [MW]	Media [MW]	Máxima [MW]
Vertiente del Mar Caribe	-0,0942	-0,3836	1,6052
Vertiente del Golfo de México	0,8969	-0,7314	-0,8142
Vertiente del Pacífico	0,1641	-0,5470	1,0510

Fuente: elaboración propia.

De la misma forma que las desviaciones que se dan durante los meses de alta producción, durante los meses de baja el parque se desvía de forma negativa durante la banda, media y mayormente de forma positiva durante las bandas mínima y máxima.

Figura 23. Promedio desviaciones (baja producción)



Fuente: elaboración propia, empleando datos de los informes de posdespacho y programación diaria publicados por el AMM.

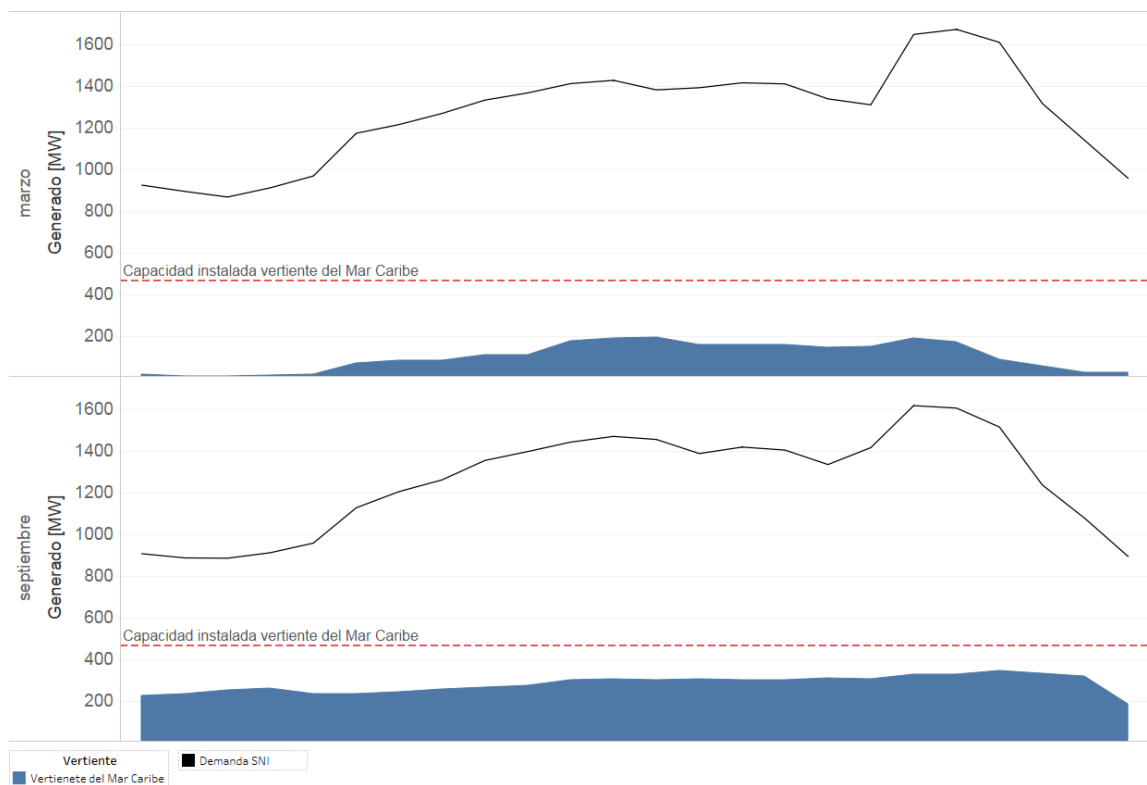
Durante la época de baja producción, las desviaciones horarias promedio de potencia activa de las centrales hidroeléctricas se encuentran entre 2,5 y -3,5 MW de potencia.

2.4. Perfil típico

Las características del perfil de generación diario del parque generador hidroeléctrico están atadas a las características hidrológicas de la cuenca en la que se encuentran instaladas cada una de las centrales. El operador del

sistema optimiza los recursos, basándose en la información declarada y los registros históricos de caudales de cada central, tomando en cuenta el nivel de los embalses asociados a cada central (si lo tiene) y las previsiones de demanda.

Figura 24. Perfil de generación (Mar Caribe)



Fuente: elaboración propia, empleando datos de los informes de posdespacho y programación diaria publicados por el AMM.

El aprovechamiento de la capacidad instalada de las centrales instaladas en la vertiente en la vertiente del Mar Caribe se muestra en la siguiente tabla.

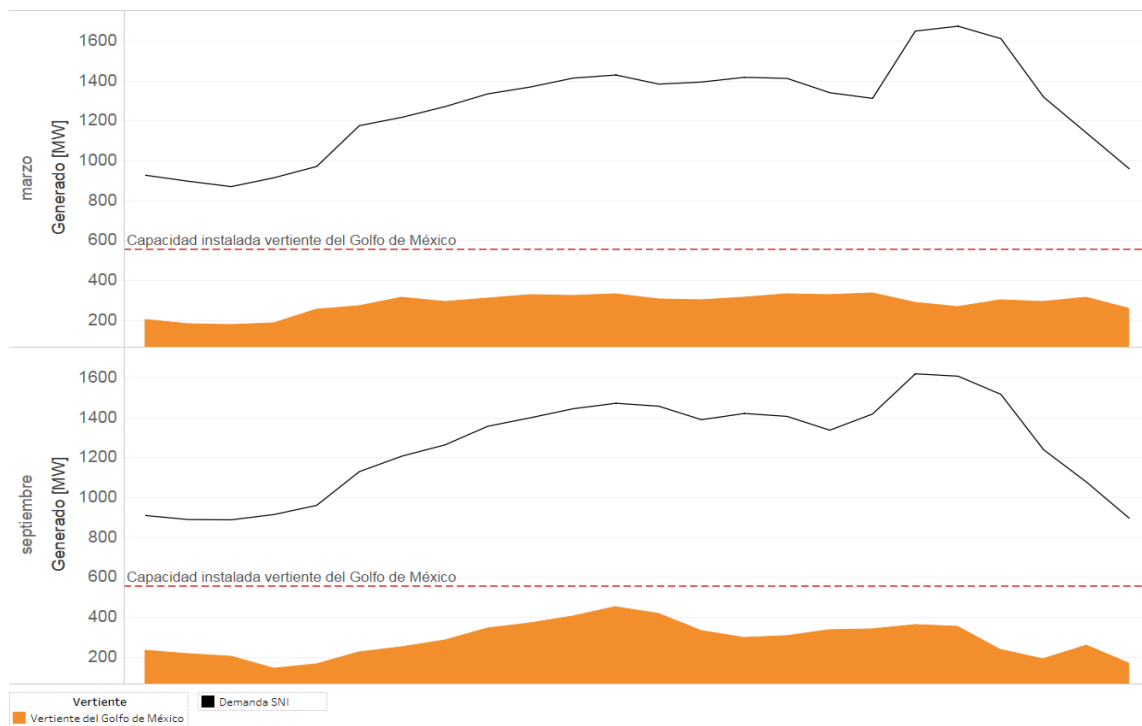
Tabla XI. **Factor de utilización (Mar Caribe)**

Mes	Utilización
marzo	21,97 %
septiembre	60,57 %

Fuente: elaboración propia.

El factor de utilización de la capacidad instalada de la vertiente del Mar Caribe alcanza hasta un 60 % durante los meses de alta producción eléctrica y un 20 % durante la época de menor aprovechamiento del recurso hidráulico.

Figura 25. **Perfil de generación (Golfo de México)**



Fuente: elaboración propia, empleando datos de los informes de posdespacho y programación diaria publicados por el AMM.

Tabla XII. **Factor de utilización (Golfo de México)**

Mes	Utilización
marzo	51,01 %
septiembre	51,55 %

Fuente: elaboración propia.

A diferencia de la vertiente del Mar Caribe, el aprovechamiento de la capacidad instalada en la vertiente del Golfo de México es similar para los dos meses (alta y baja producción), debido a que en dicha vertiente se encuentra instalada Chixoy. Esta posee el embalse de regulación más grande del país y permite utilizar el recurso hidráulico de forma homogénea durante la mayoría de los meses del año.

Figura 26. **Perfil de generación (Pacífico)**



Fuente: elaboración propia, empleando datos de los informes de posdespacho y programación diaria publicados por el AMM.

Tabla XIII. **Factor de utilización (Pacífico)**

Mes	Utilización
marzo	24,64 %
septiembre	61,01 %

Fuente: elaboración propia.

Al igual que la vertiente del Mar Caribe, el factor de utilización de la capacidad de esta región ronda el 60 % y 20 % para los meses de mayor y menor producción eléctrica, respectivamente. Un factor en común de estas regiones es que la mayoría de las centrales instaladas cuentan con embalses de regulación diaria, lo que significa que solo poseen capacidad de regular volúmenes de agua en períodos intrahorarios.

3. IMPACTO TÉCNICO DE LAS DESVIACIONES DE POTENCIA

3.1. Pérdidas de energía por efecto Joule

Como se mencionó, las líneas de transmisión consumen una pequeña fracción de la energía que se produce, y la liberan en forma de calor. A este fenómeno se le conoce como efecto Joule. Las pérdidas por dicho efecto en el sistema eléctrico de potencia de Guatemala rondan entre el 2 % al 4 % de la energía total generada. Esto indica que se tiene que generar hasta un 4 % de energía adicional a la energía que demandan los usuarios, para poderla llevar de un punto a otro.

Al ser los sistemas eléctricos de potencia un conjunto de equipos que operan interconectados, la variación de la operación de uno o varios de sus componentes repercute sobre las características eléctricas de operación del sistema. Como se evidenció en el capítulo anterior, el parque generador hidroeléctrico presenta un comportamiento sistemático en la forma en la que se desvía del despacho programado; por lo tanto, en el presente capítulo se estudiará los efectos que tiene que dicho parque se desvíe de forma negativa durante la banda media en las pérdidas por efecto Joule en el sistema de transmisión para los años 2012 a 2018, específicamente en los sistemas:

- Central
- Oriental
- Occidental
- Troncal

Los cuales operan a voltajes normalizados de:

- Sesenta y nueve mil voltios (69kV).
- Ciento treinta y ocho mil voltios (138 kV).
- Doscientos treinta mil voltios (230 kV).

3.2. Simulación

Para la simulación se utilizó el software de análisis de sistemas de potencia de Siemens, PSSE ®.

3.2.1. Premisas de la simulación

- Se consideran dos escenarios para los meses de baja y alta producción hidroeléctrica (marzo y septiembre), los cuales tienen las características que se muestra a continuación:

Tabla XIV. **Características de los escenarios simulados**

Escenario	Características
1	Se simuló el despacho programado de una hora típica de la banda media característico de cada mes y año, considerando las centrales instaladas y habilitadas para operar.
2	Tomando como base el escenario 1, se simuló el despacho considerando las desviaciones del parque hidroeléctrico, sustituyendo dicha desviaciones con energía de centrales termoeléctricas respetando el orden de mérito y la reserva primaria.

Fuente: elaboración propia.

- Se consideró para la demanda de cada escenario la correspondiente a la demanda típica de los meses de marzo y septiembre de los años comprendidos entre el 2012 y 2018.

Tabla XV. **Demanda escenarios**

Año	Marzo [MW]	Septiembre [MW]
2012	1 167,2	1 175,6
2013	1 172,0	1 170,7
2014	1 193,3	1 358,3
2015	1 357,7	1 482,3
2016	1 522,0	1 509,0
2017	1 517,0	1 600,2
2018	1 672,2	1 641,8

Fuente: elaboración propia.

- El despacho que se consideró para cada escenario es el característico de los meses de marzo y septiembre para los años comprendidos entre el 2012 y 2018.

Tabla XVI. **Energía generada escenarios**

Generación Local más importaciones				
AÑO	Marzo [MW]		Septiembre [MW]	
	1	2	1	2
2012	1 214,61	1 214,88	1 262,86	1 260,71
2013	1 215,32	1 215,36	1 214,40	1 214,23
2014	1 233,49	1 233,74	1 436,40	1 434,90
2015	1 405,96	1 406,43	1 510,88	1 511,47
2016	1 567,74	1 568,73	1 561,27	1 561,12
2017	1 566,30	1 566,50	1 656,73	1 655,28
2018	1 723,51	1 723,85	1 702,38	1 700,26

Fuente: elaboración propia.

El porcentaje de energía generado por cada tecnología es el que se muestra en la figura 22.

- El sistema de transmisión que se consideró para cada escenario es el existente para cada periodo de estudio.

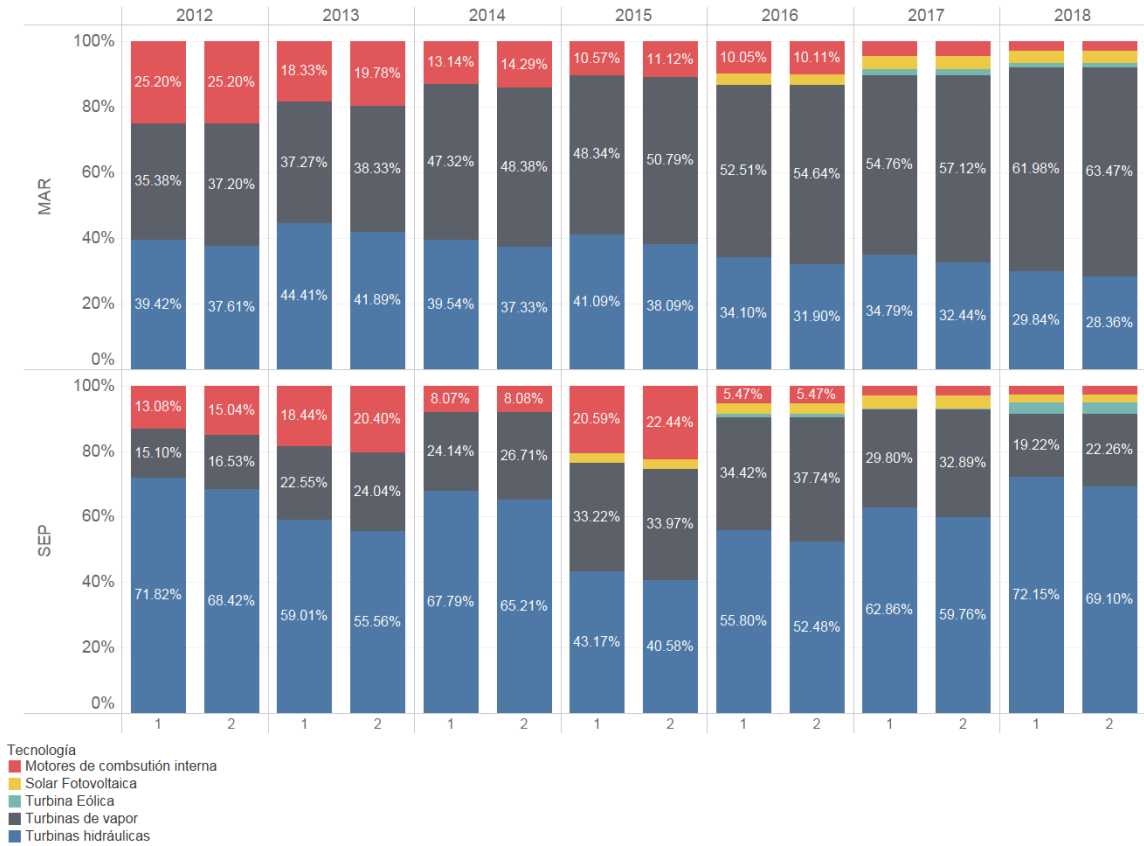
3.3. Análisis de los resultados

La demanda de energía eléctrica considerada en las simulaciones corresponde a valores de demanda típicos de los meses y años en el sistema eléctrico de potencia de Guatemala; además, se observa el crecimiento de la misma año con año.

A continuación se muestran los escenarios de despacho para cada mes y año, en donde se consideran dos escenarios para los meses de marzo y septiembre, los cuales son:

- Escenario 1: es en el que se simuló el despacho con valores programados.
- Escenario 2: este corresponde al despacho con desviaciones negativas de potencia activa del parque generador hidroeléctrico.

Figura 27. Despacho considerado en los escenarios



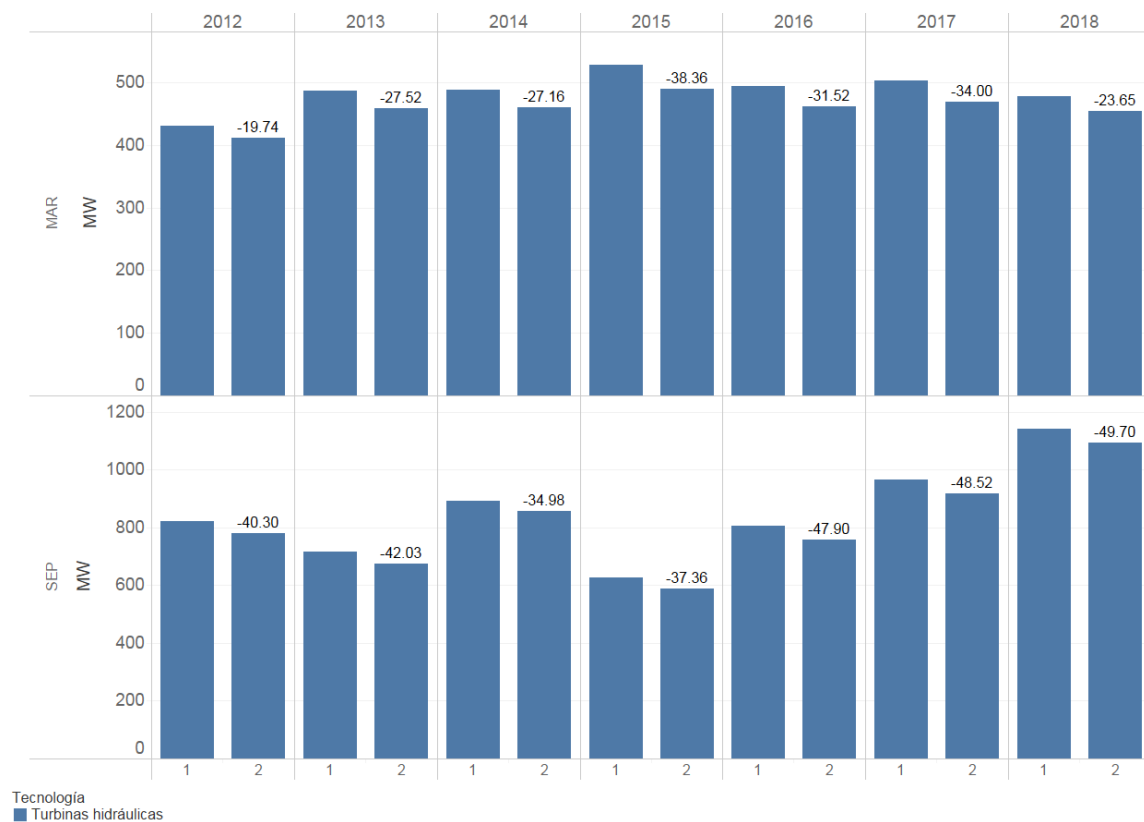
Fuente: elaboración propia.

Como se mencionó, durante los meses de septiembre la producción de las centrales hidroeléctricas se incrementa debido a la mayor disponibilidad del recurso hidráulico. Para los escenarios utilizados que representan los meses de septiembre la participación del recurso hidroeléctrico oscila entre 40 % y 70 %.

Por otra parte, durante los meses de marzo, en donde típicamente ocurre la menor producción hidroeléctrica, la producción oscila entre el 28 % y 40 %.

A continuación se observan las diferencias entre la potencia programada en el escenario 1 y el despacho ejecutado en el escenario 2; las diferencias rondan entre los 19 y 50 MW, lo cual es consistente con lo descrito en el capítulo anterior.

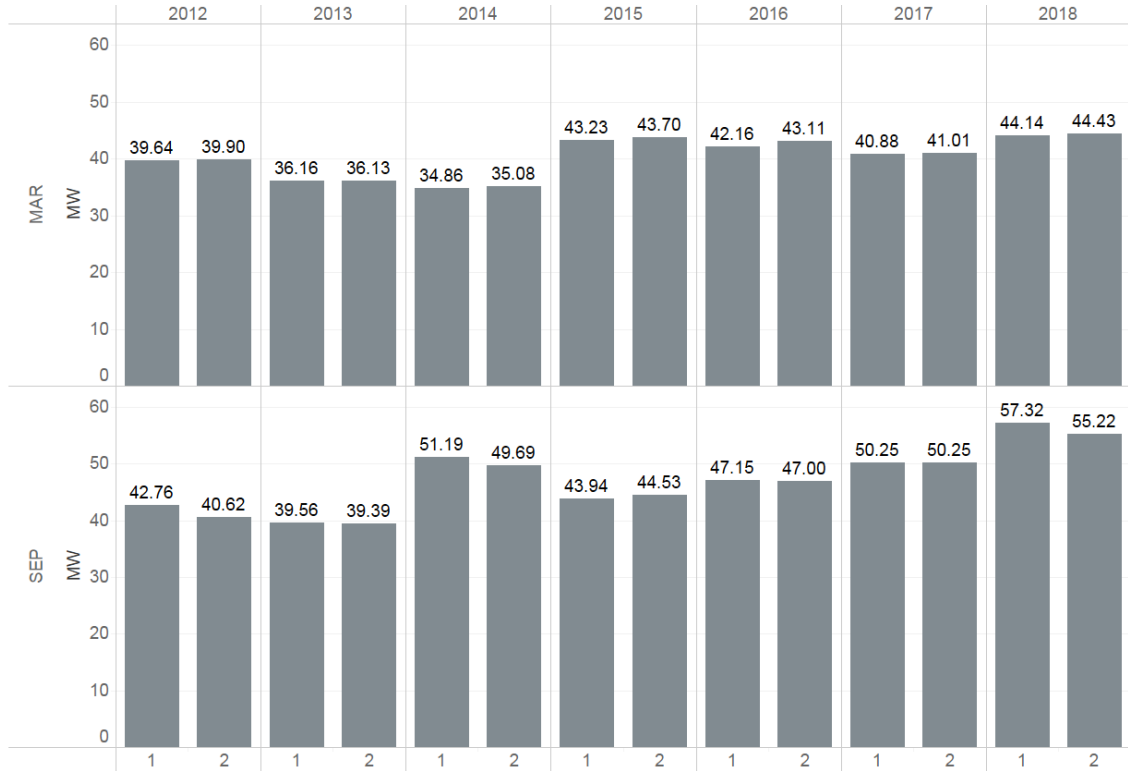
Figura 28. Diferencias entre escenarios



Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las simulaciones se muestran a continuación, tanto para el escenario 1 como para el escenario 2.

Figura 29. Pérdidas de potencia activa



Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pérdidas totales del sistema eléctrico de potencia de Guatemala varían para cada mes y año; sin embargo, las mismas se encuentran dentro de los valores típicos de pérdidas, lo que indica que las desviaciones negativas de potencia activa del parque generador hidroeléctrico no causan grandes variaciones en el comportamiento total de las pérdidas.

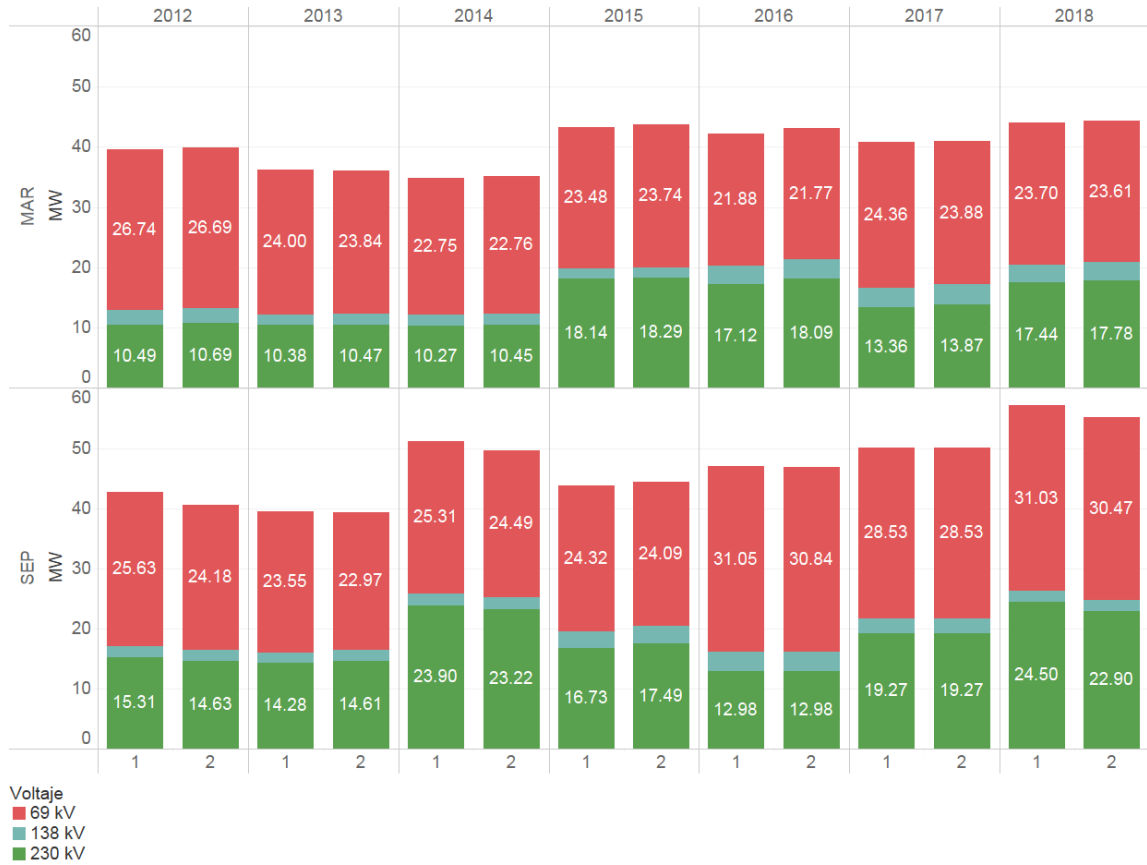
Tabla XVII. **Porcentaje de pérdidas**

AÑO	Marzo		Septiembre	
	Escenarios			
	1	2	1	2
2012	3,26 %	3,28 %	3,39 %	3,22 %
2013	2,98 %	2,97 %	3,26 %	3,24 %
2014	2,83 %	2,84 %	3,56 %	3,46 %
2015	3,07 %	3,11 %	2,91 %	2,95 %
2016	2,69 %	2,75 %	3,02 %	3,01 %
2017	2,61 %	2,62 %	3,03 %	3,04 %
2018	2,56 %	2,58 %	3,37 %	3,25 %

Fuente: elaboración propia.

A continuación se muestran los valores de pérdidas por nivel de tensión para los escenarios simulados:

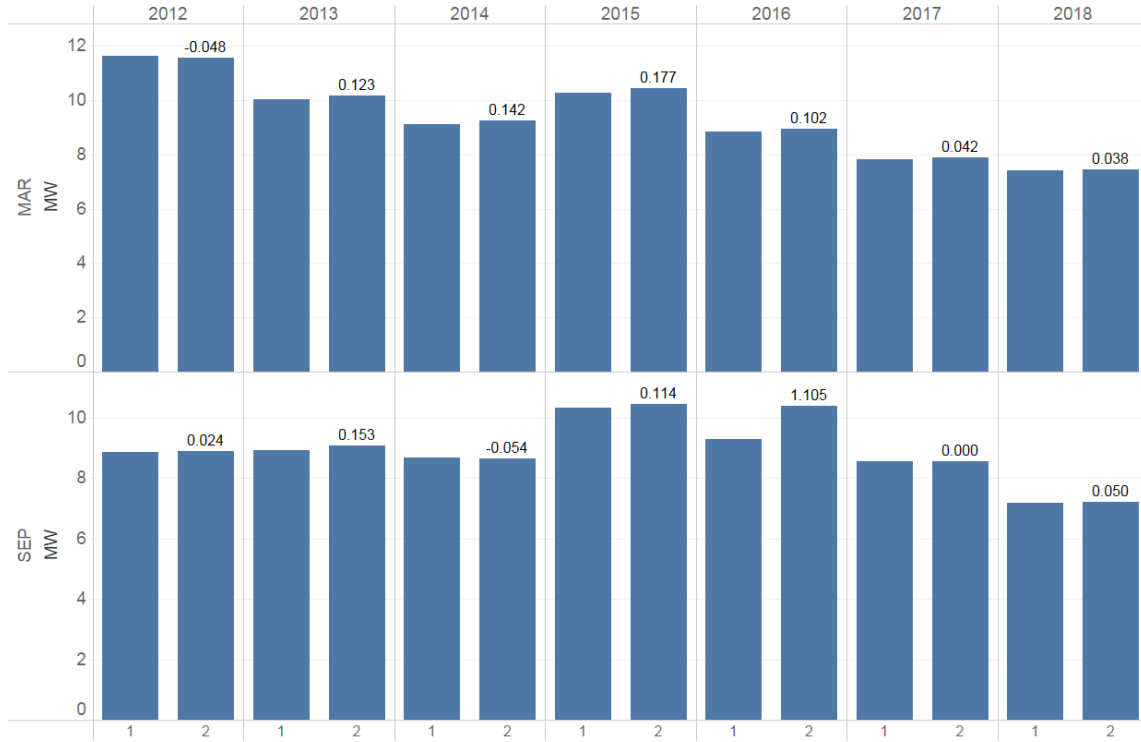
Figura 30. Pérdidas por nivel de tensión



Fuente: elaboración propia.

A continuación se muestran los valores de pérdidas resultados de las simulaciones para el sistema central, el cual está compuesto por las instalaciones de transmisión que geográficamente se encuentran ubicadas cerca del departamento de Guatemala.

Figura 31. Central

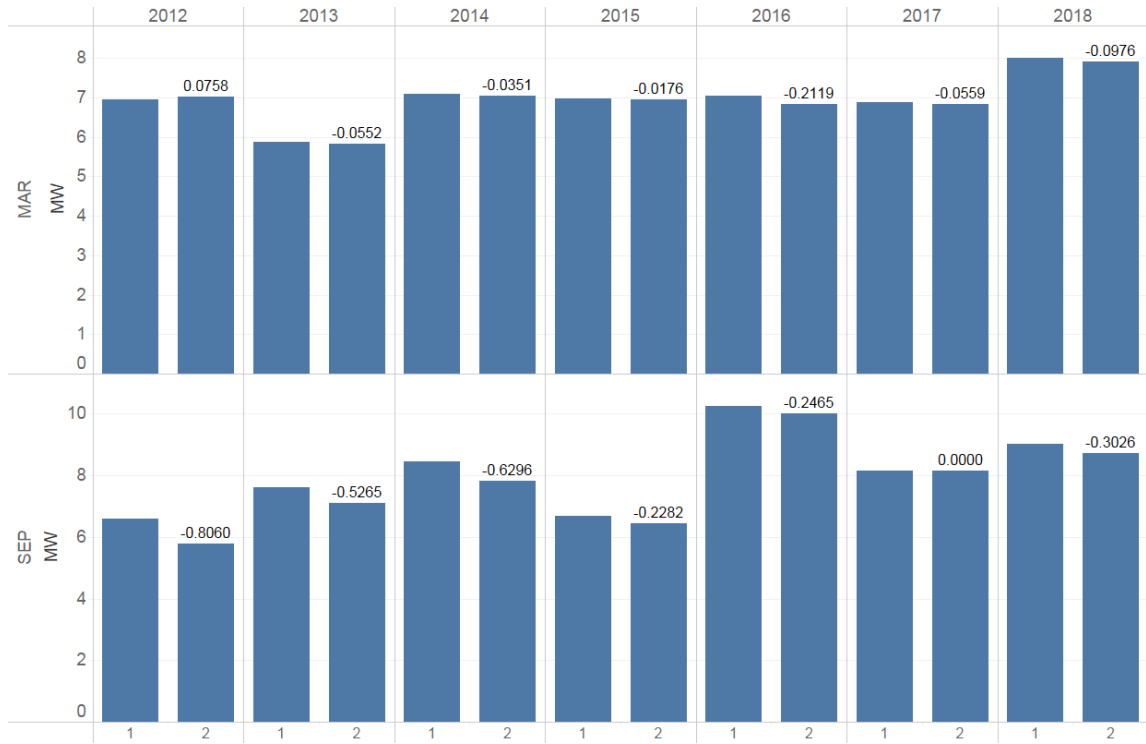


Fuente: elaboración propia.

Las pérdidas del sistema de transmisión central son al alza. Lo anterior deriva de la cercanía de las centrales que suplieron la energía no generada por la centrales hidroeléctricas.

A continuación se muestran los valores de pérdidas de energía en el sistema de transmisión de occidente, cuyas instalaciones se encuentran ubicadas geográficamente en la región occidental de Guatemala.

Figura 32. Occidente



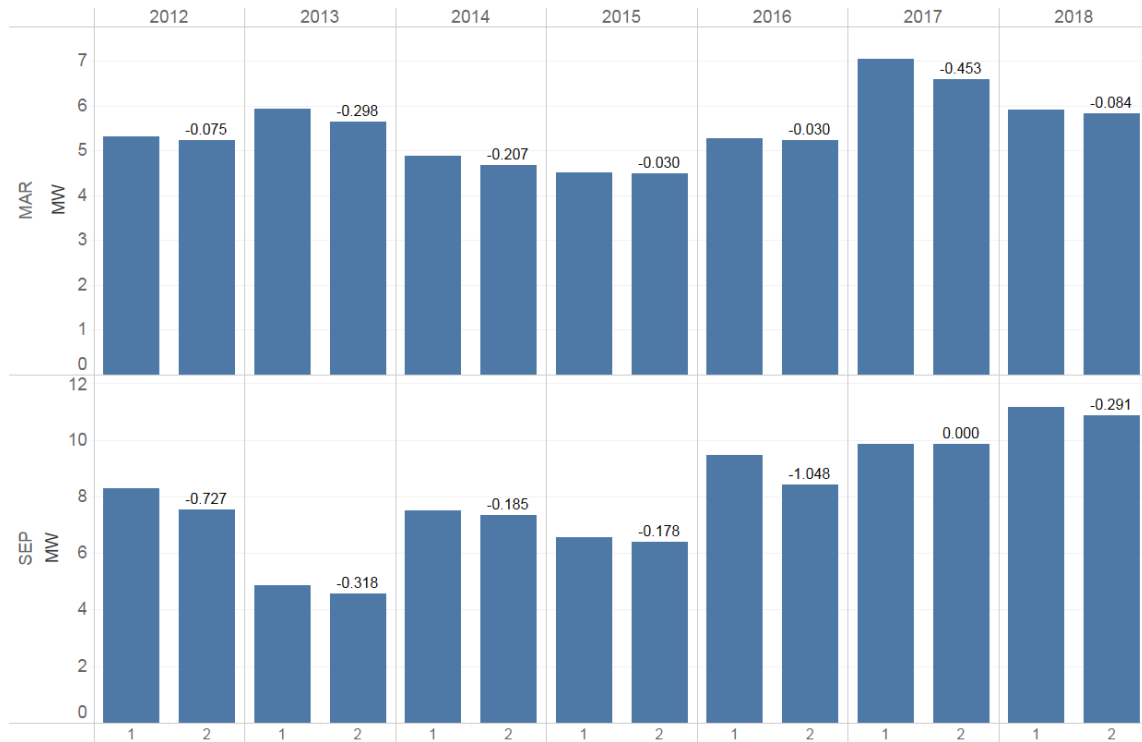
Fuente: elaboración propia.

Las pérdidas en el sistema de transmisión occidental son a la baja, como consecuencia de la reducción en la generación de las centrales hidroeléctricas, ya que la mayoría se encuentra conectada a este sistema. El mismo se encuentra entre dos vertientes, la del Pacífico y la del Golfo de México; por lo tanto, al dejar de generar dichas centrales la energía que se transmite mediante las líneas que forman parte de este sistema se reduce y, en consecuencia, las pérdidas.

A continuación se muestran los valores de pérdidas de energía en el sistema de transmisión de oriente. Las instalaciones de transmisión de este

sistema se encuentran ubicadas geográficamente en la región oriental de Guatemala.

Figura 33. Oriente

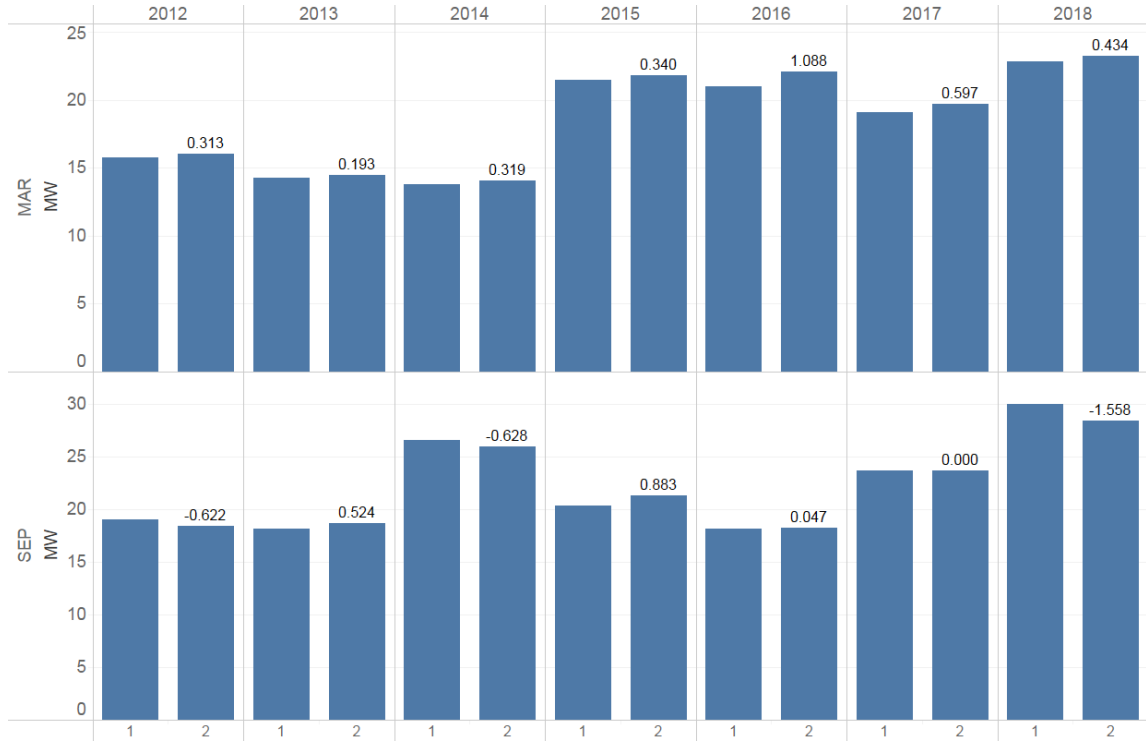


Fuente: elaboración propia.

Al igual que la región occidental, las pérdidas de energía eléctrica en las líneas de este sistema, al considerar las desviaciones de potencia activa del parque generador instalado en esta región (vertiente del Mar Caribe), se reducen como consecuencia de la reducción en la producción hidroeléctrica.

A continuación se muestran los valores de pérdidas de energía resultado de las simulaciones para el sistema de transmisión troncal, el cual consiste de todas las instalaciones que conforman la red mallada de 230 kV.

Figura 34. Troncal



Fuente: elaboración propia.

El comportamiento de las pérdidas en este sistema arrojó incrementos y reducciones, como consecuencia de que dicho sistema interconecta los sistemas central, occidental y oriental, los flujos de potencia activa en el mismo varían.

4. IMPACTO ECONÓMICO DE LAS DESVIACIONES

Se considerará impacto económico al incremento o reducción en el costo total de la operación debido a las desviaciones de potencia activa del parque generador hidroeléctrico.

4.1. Costo total de la operación

La operación de cada uno de los elementos que componen los sistemas eléctricos de potencia tiene un costo asociado. Durante la programación del despacho económico, el operador considera todas las posibles combinaciones de operación de los elementos del sistema, y selecciona el que resulte en el menor costo total. Los posibles escenarios de operación están sujetos a la disponibilidad de los equipos, fuentes de energía primaria, condiciones de la demanda nacional y de exportación, y demás condiciones restrictivas tales como los niveles de calidad y seguridad operativa del sistema.

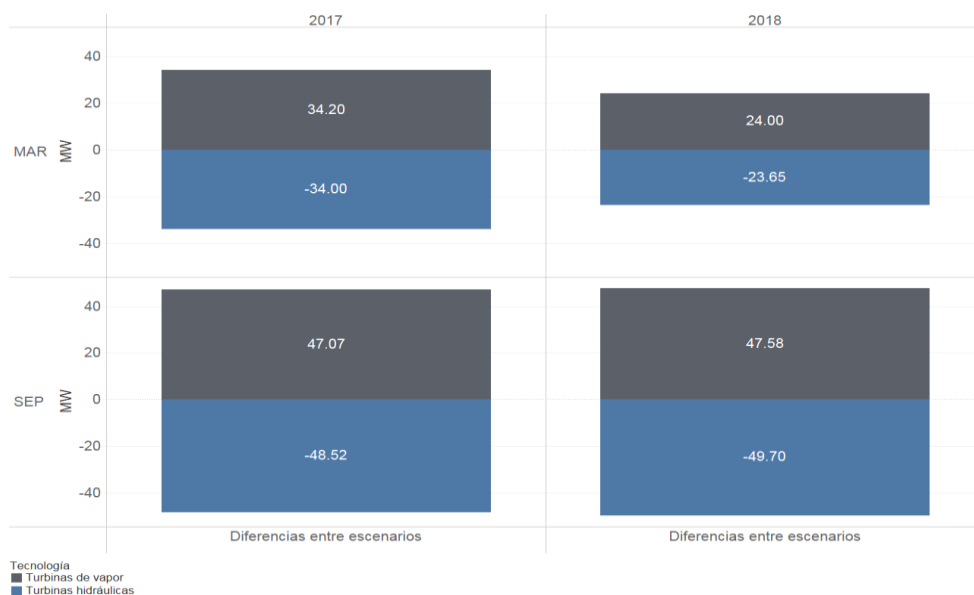
La optimización de la operación se refiere a obtener el mínimo costo del conjunto de operaciones del parque generador considerando el sistema de transmisión. Con tal fin se consideran dentro del proceso de optimización la eficiencia de las unidades generadoras, las restricciones de entrada y salida de operación, el costo de operación y mantenimiento, las pérdidas en el sistema de transmisión a través de los factores de pérdidas nodales trasladados al nodo de referencia y el costo de la energía primaria que utilizan para la generación de energía eléctrica (costo variable de generación).

Como se evidenció en los capítulos 2 y 3 del presente estudio, las desviaciones de potencia activa del parque generador hidroeléctrico varían dependiendo de la época del año y de la abundancia o escasez del recurso hidráulico.

4.2. Sobrecostos por las desviaciones

La operación de centrales con costos de operación superiores debido a la desviación negativa de las centrales hidroeléctricas genera costos imprevistos en la operación del sistema. Como se observa en la figura que se muestra a continuación, para los escenarios de marzo y septiembre de los años 2017 y 2018 las desviaciones de potencia activa del parque generador hidroeléctrico fueron compensadas por generación de centrales termoeléctricas, específicamente, turbinas de vapor.

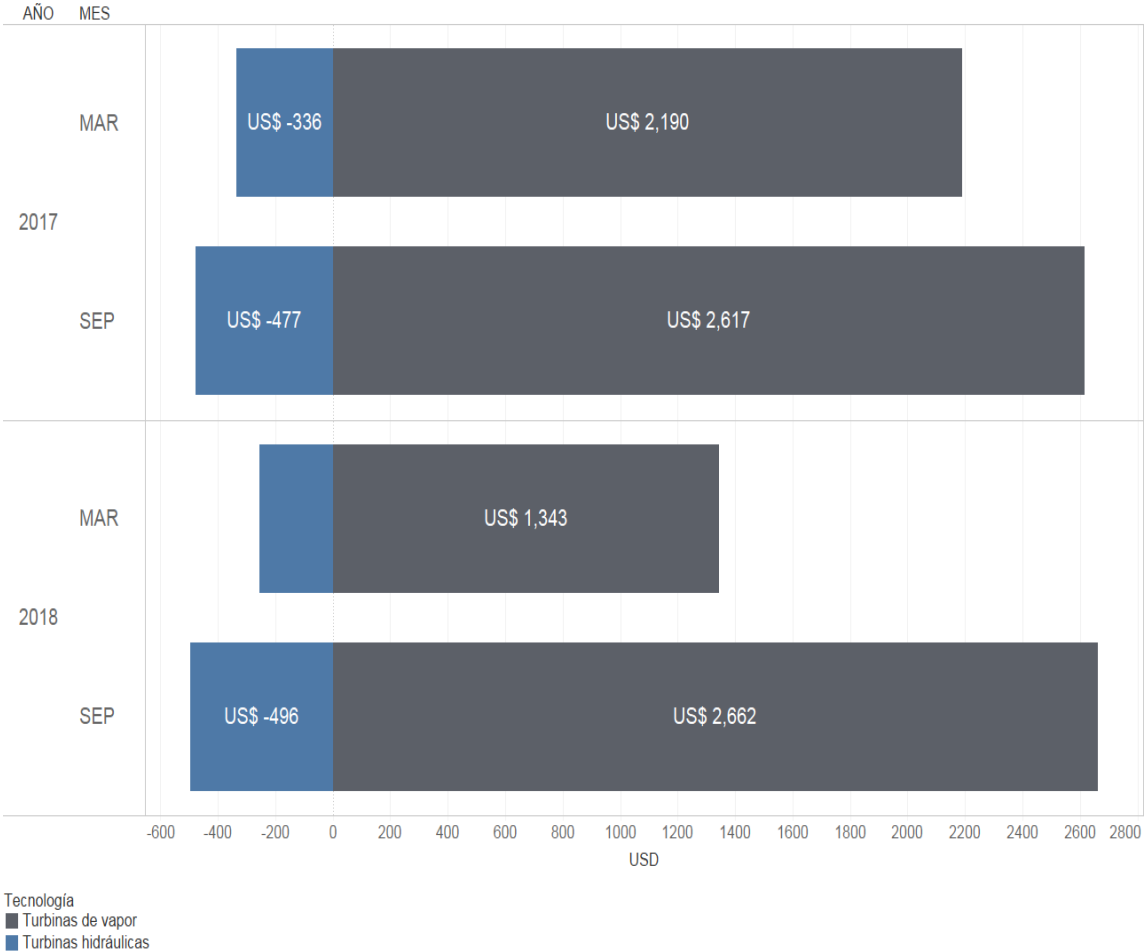
Figura 35. Desviaciones 2017-2018



Fuente: elaboración propia.

Las centrales termoeléctricas de esta tecnología tienen costos de operación superiores a los de las centrales hidroeléctricas, ya que estas necesitan combustibles fósiles para su funcionamiento. En la siguiente figura se observa la valorización en dólares de los Estados Unidos la energía que dejaron de generar las centrales hidroeléctricas y que fue sustituida por las centrales termoeléctricas.

Figura 36. **Sobre costos**



Fuente: elaboración propia.

4.3. Análisis de los resultados

La operación de centrales termoeléctricas para el cubrimiento de las desviaciones de potencia activa del parque generador hidroeléctrico resulta en casi un 200 % superior respecto del costo de operación de las centrales hidroeléctricas.

5. PERSPECTIVAS DE LA CAPACIDAD INSTALADA Y OPERACIÓN

La planificación a largo plazo del Ministerio de Energía y Minas contenida en el documento denominado “Plan de expansión del sistema de generación y transporte 2018-2032”, considera que para el año 2032 se espera que el 80 % de la energía sea generada a través de fuentes de energía primaria renovable. Lo anterior a través de la construcción de centrales de distintas tecnologías renovables, de las cuales a continuación se presentan las que corresponden a centrales hidroeléctricas.

Tabla XVIII. **Centrales hidroeléctricas futuras**

Planta	Capacidad (MW)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	Estado del proyecto
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	
		8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	
Renace IV	64					x						En construcción
Manantial IV	12					x						En construcción
Pojom II	20							x				En construcción
Oxec II	45		x									En construcción
GDRs Hidro	10			x								En construcción
GDRs Hidro	10				x							En construcción
GDRs Hidro	10								x			En construcción
San Andrés	10.8						x					Candidata

Fuente: elaboración propia, empleando documento “Plan de Expansión del Sistema de Generación y Transporte 2018-2032”

Las centrales hidroeléctricas previstas en los planes, y que deberán estar operando en el año 2027, adicionarán 181,8 MW de potencia instalada. En la

siguiente tabla se observa el crecimiento previsto de la capacidad instalada del parque generador hidroeléctrico.

Tabla XIX. Crecimiento de la capacidad instalada

MW									
2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
1,501.80	1,546.80	1,556.80	1,566.80	1,642.80	1,673.60	1,673.60	1,683.60	1,683.60	1,683.60

Fuente: elaboración propia.

Como se mencionó, según lo planificado por el estado de Guatemala para el año 2032, se espera que el 80 % de la energía eléctrica que se genere en el país sea a través de fuentes de energía renovable. En la siguiente tabla se muestran los valores de energía generada por tipo de recurso desde el 2005.

Tabla XX. Tipo de recurso

Año	No renovable	Renovable	Energía [GWh]
			Total
2005	49,2 %	50,8 %	7 242,97
2006	45,1 %	54,9 %	7 445,02
2007	49,8 %	50,2 %	7 936,74
2008	42,5 %	57,5 %	7 922,00
2009	47,6 %	52,4 %	8 015,00
2010	40,6 %	59,4 %	8 276,00
2011	40,6 %	59,4 %	8 672,15
2012	36,4 %	63,6 %	8 929,28
2013	35,6 %	64,4 %	9 537,07
2014	37,6 %	62,4 %	10 490,46
2015	45,2 %	54,8 %	10 886,66
2016	44,7 %	55,3 %	11 624,82
2017	37,3 %	62,7 %	12 381,29
2018	40,3 %	59,8 %	12 522,39

Fuente: elaboración propia, empleando datos de los archivos de generación mensual publicados por el AMM.

Se observa que para el periodo 2005 a 2018 el porcentaje de energía generada mediante fuentes de energía renovables ronda entre 51 % y 64 %, con un promedio de 58 %. Lo anterior evidencia que para los años analizados, al menos más de la mitad de la energía generada es con recursos renovables.

En la siguiente tabla se puede observar la composición de la matriz desagregada por combustible o fuente primaria de energía.

Tabla XXI. Matriz histórica de generación

Año	Fuente primaria %										
	Biogás	Biomasa	Bunker	Carbón	Diésel	Eólica	Geotermia	Hidroeléctrica	Importación	Orimulsión	Solar
2005	0,0 %	8,5 %	20,9 %	13,5 %	0,3 %	0,0 %	2,0 %	40,3 %	0,3 %	14,1 %	0,0 %
2006	0,0 %	9,4 %	26,5 %	13,6 %	0,1 %	0,0 %	1,9 %	43,6 %	0,1 %	4,8 %	0,0 %
2007	0,0 %	9,7 %	36,4 %	13,1 %	0,2 %	0,0 %	2,9 %	37,6 %	0,1 %	0,0 %	0,0 %
2008	0,0 %	8,3 %	29,0 %	13,2 %	0,2 %	0,0 %	3,4 %	45,8 %	0,1 %	0,0 %	0,0 %
2009	0,0 %	12,8 %	38,3 %	8,5 %	0,4 %	0,0 %	3,5 %	36,1 %	0,5 %	0,0 %	0,0 %
2010	0,0 %	10,8 %	23,6 %	12,5 %	0,0 %	0,0 %	3,1 %	45,5 %	4,4 %	0,0 %	0,0 %
2011	0,0 %	9,5 %	21,6 %	12,5 %	0,3 %	0,0 %	2,7 %	47,2 %	6,1 %	0,0 %	0,0 %
2012	0,0 %	11,1 %	20,0 %	13,9 %	0,0 %	0,0 %	2,8 %	49,7 %	2,5 %	0,0 %	0,0 %
2013	0,0 %	13,6 %	15,7 %	17,1 %	0,0 %	0,0 %	2,2 %	48,6 %	2,8 %	0,0 %	0,0 %
2014	0,0 %	14,0 %	13,2 %	17,7 %	0,0 %	0,0 %	2,4 %	46,0 %	6,8 %	0,0 %	0,1 %
2015	0,0 %	14,7 %	18,1 %	21,7 %	0,0 %	1,0 %	2,3 %	35,4 %	5,4 %	0,0 %	1,4 %
2016	0,1 %	15,2 %	13,7 %	24,6 %	0,0 %	1,9 %	2,5 %	34,0 %	6,4 %	0,0 %	1,6 %
2017	0,1 %	10,6 %	6,5 %	23,6 %	0,0 %	1,8 %	2,0 %	46,6 %	7,2 %	0,0 %	1,6 %
2018	0,2 %	13,4 %	2,9 %	34,1 %	0,0 %	2,5 %	1,9 %	40,1 %	3,2 %	0,0 %	1,6 %

Fuente: elaboración propia, empleando datos de los archivos de generación mensual publicados por el AMM.

El porcentaje de participación de las centrales hidroeléctricas ronda entre 34 % y 50 % con un promedio de 42 %. Lo anterior depende de la disponibilidad del recurso hidráulico de cada año, Como se evidenció en la tabla XIX se espera la adición de 181,8 MW de capacidad instalada de centrales hidroeléctricas para el año 2027.

Sin embargo, como se vio en el capítulo 2, el factor de utilización de las centrales de una vertiente se encuentra entre un 20 % a 60 % de la capacidad instalada, dependiendo de la época del año. Por lo que al considerar la nueva capacidad prevista y el crecimiento normal de la demanda para cada año, los resultados de lo planificado conllevarían a un leve aumento en la energía generada mediante fuentes de energía renovable.

CONCLUSIONES

1. Las centrales hidroeléctricas que componen el parque generador guatemalteco se encuentran instaladas en tres vertientes denominadas del golfo de México, del Mar Caribe y del Pacífico. La potencia instalada en cada vertiente es 556,6 MW, 469,2 MW, 419,4 MW, respectivamente.
2. Las centrales hidroeléctricas se desvían de forma sistemática entre -2,13 MW y 1,60 MW dependiendo la época del año y la banda horaria. La banda media se tiende a generar por debajo de lo programado en el despacho diario.
3. Las pérdidas de potencia activa por efecto Joule en los sistemas de transmisión de 230 kV, 138 kV y 69 kV se reducen a medida que la generación de centrales hidroeléctricas se desvía negativamente.
4. El costo total de la operación del sistema eléctrico de potencia se incrementa al requerir centrales con costos variables de generación superiores a los de las centrales hidroeléctricas.
5. La adición de capacidad instalada de centrales hidroeléctricas programadas al año 2027, será de 181,8 MW.

RECOMENDACIONES

1. Evaluar y dar seguimiento al comportamiento de las centrales hidroeléctricas durante la operación y coordinación en tiempo real, considerando la medición de cota del embalse.
2. Considerar, dentro de los futuros planes de expansión, la construcción de centrales hidroeléctricas con capacidad de regulación superior a 24 horas.
3. Evaluar dentro del modelo de optimización del despacho económico el comportamiento real del parque generador hidroeléctrico, con factores de indisponibilidad durante las horas de la banda media.
4. Analizar la causalidad entre el crecimiento de las energías renovables no convencionales y las desviaciones negativas del parque generador hidroeléctrico para escenarios futuros.

BIBLIOGRAFÍA

1. CARTA GONZÁLEZ, José Antonio; CALERO PEREZ, Roque; COLMENAR SANTOS, Antonio y CASTRO GIL, Manuel Alonzo. *Centrales de energía (Generación eléctrica con energías renovables). Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables*. España: Pearson Educación, S.A. 2009. 728 p.
2. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Norma de coordinación comercial número uno*. [en línea]. <www.cnee.gob.gt/pdf/normas/ncc01.pdf>. [Consulta: 16 de octubre de 2019].
3. Congreso de la República de Guatemala. *Acuerdo gubernativo 93-96*. [en línea]. <www.cnee.gob.gt/pdf/marcolegal/LEY%20GENERAL%20DE%20ELECTRICIDAD%20Y%20REGLAMENTOS.pdf>. [Consulta: 16 de octubre de 2019].
4. HAYT, William Jr. *Teoría Electromagnética*. 7a ed. México: McGraw-Hill, 2006. 582 p.
5. MEM. Acuerdo ministerial número 012-2018. *Plan de Expansión Indicativo del Sistema de Generación 2018-2032*. [en línea]. <<http://www.mem.gob.gt/planes-de-expansion-del-sistema-de-generacion-y-transporte/>>. [Consulta: 16 de octubre de 2019].

6. STEVENSON, William; Grainger, John. *Análisis de sistema de potencia*. México: McGraw-Hill, 1999, 740 p.