



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados

**ESTUDIO DE SEGURIDAD ENERGÉTICA DEL PARQUE GENERADOR DE ELECTRICIDAD  
DE GUATEMALA ANTE ESCENARIOS DE PÉRDIDA DE GENERACIÓN DE LAS  
CENTRALES SAN JOSÉ Y JAGUAR ENERGY**

**Ing. Victor Hugo Lutín Sandoval**

Asesorado por el Mtro. Ing. Rubén Alfredo Cerón Suchini

Guatemala, junio de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DE SEGURIDAD ENERGÉTICA DEL PARQUE GENERADOR DE ELECTRICIDAD  
DE GUATEMALA ANTE ESCENARIOS DE PÉRDIDA DE GENERACIÓN DE LAS  
CENTRALES SAN JOSÉ Y JAGUAR ENERGY**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ING. VICTOR HUGO LUTÍN SANDOVAL**

ASESORADO POR EL MTRO. ING. RUBÉN ALFREDO CERÓN SUCHINI

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**MAESTRO EN GESTIÓN DE MERCADOS ELÉCTRICOS REGULADOS**

GUATEMALA, JUNIO DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Ing. 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 DE DEFENSA DE TESIS**

DECANA	Ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Dario Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Mauro Fernando Oroxom Popa
SECRETARIO	Mtro. 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:

### **ESTUDIO DE SEGURIDAD ENERGÉTICA DEL PARQUE GENERADOR DE ELECTRICIDAD DE GUATEMALA ANTE ESCENARIOS DE PÉRDIDA DE GENERACIÓN DE LAS CENTRALES SAN JOSÉ Y JAGUAR ENERGY**


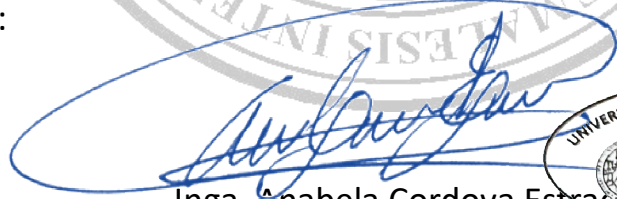
Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 27 de enero de 2020.

**Ing. Victor Hugo Lutín Sandoval**

DTG. 252.2021.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **ESTUDIO DE SEGURIDAD ENERGÉTICA DEL PARQUE GENERADOR DE ELECTRICIDAD DE GUATEMALA ANTE ESCENARIOS DE PÉRDIDA DE GENERACIÓN DE LAS CENTRALES SAN JOSÉ Y JAGUAR ENERGY**, presentado por el Ingeniero: **Victor Hugo Lutín Sandoval**, estudiante de la **Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana

Guatemala, junio de 2021.

AACE/asga



Guatemala, Junio 2021

EEPFI-0604-2021

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **“ESTUDIO DE SEGURIDAD ENERGÉTICA DEL PARQUE GENERADOR DE ELECTRICIDAD DE GUATEMALA ANTE ESCENARIOS DE PÉRDIDA DE GENERACIÓN DE LAS CENTRALES SAN JOSÉ Y JAGUAR ENERGY”** presentado por el Ingeniero **Víctor Hugo Luñín Sandoval** identifica con carné **201325526** correspondiente al programa de **Maestría en Gestión de Mercados Electricos Regulados** apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

*“Id y Enseñad a Todos”*

  
**Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Coll**  
Director







Guatemala, Junio 2021

EEPI-0605-2021

Como Coordinador del programa de Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“ESTUDIO DE SEGURIDAD ENERGÉTICA DEL PARQUE GENERADOR DE ELECTRICIDAD DE GUATEMALA ANTE ESCENARIOS DE PÉRDIDA DE GENERACIÓN DE LAS CENTRALES SAN JOSÉ Y JAGUAR ENERGY”** presentado por el Ingeniero **Víctor Hugo Lufín Sandoval** quien se identifica con el número de carné **201325526**.

Atentamente,

*“Id y Enseñad a Todos”*



**Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque**  
Coordinador de Maestría  
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, Junio 2021

EEPFI-0606-2021

En mi calidad como Asesor del Ingeniero **Victor Hugo Luñin Sandoval** quien se identifica con número de carné **201325526** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“ESTUDIO DE SEGURIDAD ENERGÉTICA DEL PARQUE GENERADOR DE ELECTRICIDAD DE GUATEMALA ANTE ESCENARIOS DE PÉRDIDA DE GENERACIÓN DE LAS CENTRALES SAN JOSÉ Y JAGUAR ENERGY”** quien se encuentra en el programa de Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

*“Id y Enseñad a Todos”*

**MSc. Rubén Alfredo Cerón Suchini**  
**Asesor**



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por ser el centro de mi vida y por darme las fuerzas para no rendirme en ningún momento.
- Mi padre** Victor Lutín, por seguir guiándome, amándome y motivándome desde el cielo, a quien dedico cada logro y cada paso que doy.
- Mi madre** Mayra Sandoval, por ser el amor de mi vida y guiarme en todo momento, ya que el amor de una madre es como la caricia de Dios.
- Mis hermanos** Alba, Vicky, Cindy, Ada y Manuel Lutín, por todo su amor y apoyo incondicional, además de ser mis mejores amigos y confidentes a lo largo de mi vida.
- Mi familia** A cada uno de los miembros de mi familia, sobre todo a los que han partido de este mundo para gozar de la presencia de Dios, por ellos y para ellos sea el reino de los cielos y los logros que pueda alcanzar.
- Mis amigos en general** Por todas las experiencias vividas dentro y fuera de las aulas, miles de gracias por todo.

## AGRADECIMIENTOS A:

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por formarme a nivel académico y darme las herramientas necesarias para desenvolverme profesionalmente. Eternamente agradecido con mi <i>alma mater</i> .
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por inculcarme los valores académicos más importantes para mí, sobre todo la perseverancia y la responsabilidad.
<b>Escuela de Estudios de Postgrado</b>	Por darme la oportunidad de seguir creciendo intelectualmente y de desenvolverme al lado de grandes profesionales.
<b>Mi asesor</b>	Rubén Cerón, por compartir todo su conocimiento conmigo, además de su apoyo incondicional y gran amistad.
<b>Administrador del Mercado Mayorista</b>	Por permitirme iniciar mi carrera profesional, además de darme la oportunidad de conocer a grandes profesionales, principalmente a mis amigos y mentores de Programación Diaria.
<b>Ing. Cristian López</b>	Por todo su apoyo y amistad, sobre todo para ayudarme a plantear el presente trabajo de graduación.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XVII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXV
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO .....	XXVII
INTRODUCCIÓN .....	XXIX
1. MARCO REFERENCIAL.....	1
1.1. Estudios previos .....	1
1.2. Antecedentes.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Seguridad energética .....	5
2.1.1. Concepto de seguridad energética .....	6
2.1.2. Diversificación energética .....	6
2.1.3. Seguridad energética en sistemas eléctricos .....	7
2.2. Recursos energéticos no renovables .....	8
2.2.1. Petróleo .....	9
2.2.2. Gas natural .....	10
2.2.3. Carbón mineral .....	11
2.3. Parques generadores de electricidad .....	12
2.3.1. Tecnologías de generación de electricidad .....	13
2.3.2. Importaciones de electricidad .....	15

2.3.3.	Demanda de electricidad.....	16
2.4.	Despacho económico de electricidad.....	17
2.4.1.	Programación lineal.....	17
2.4.2.	Función objetivo .....	18
2.4.3.	Herramienta nuevo corto plazo .....	19
2.5.	Indicadores económicos de electricidad.....	20
2.5.1.	Precio <i>spot</i> .....	21
2.5.2.	Costos variables de generación .....	22
2.5.3.	Costo operativo .....	23
3.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN .....	25
3.1.	Características del estudio .....	25
3.1.1.	Diseño .....	25
3.1.2.	Enfoque.....	25
3.1.3.	Alcance.....	26
3.1.4.	Unidad de análisis .....	26
3.2.	Variables .....	27
3.3.	Fases del desarrollo de la investigación.....	28
3.3.1.	Fase 1 .....	28
3.3.2.	Fase 2 .....	28
3.3.3.	Fase 3 .....	29
3.3.4.	Fase 4 .....	30
3.3.5.	Fase 5 .....	31
3.3.6.	Organización de la información .....	32
3.3.6.1.	Datos generales .....	32
3.3.6.2.	Datos específicos .....	34
3.3.6.2.1.	Precio <i>spot</i> .....	34
3.3.6.2.2.	Costo operativo .....	35

	3.3.6.2.3.	Transacciones internacionales .....	35
	3.3.6.2.4.	Demanda desabastecida .....	37
3.4.	Determinación de escenarios .....		37
3.4.1.	Finalización de época de zafra y época lluviosa en Guatemala .....		38
3.4.2.	Otras consideraciones .....		40
3.5.	Obtención de insumos .....		40
3.5.1.	Bases de datos del NCP .....		41
3.5.2.	Declaración de <i>stock</i> de combustibles.....		41
3.5.3.	Programaciones del Administrador del Mercado Mayorista .....		41
3.6.	Técnicas de análisis de información .....		42
3.6.1.	Tolerancia de los resultados obtenidos .....		42
3.6.2.	Métodos de análisis de datos .....		43
	3.6.2.1.	Totalización de resultados .....	44
	3.6.2.2.	Variación total .....	44
	3.6.2.3.	Variación porcentual .....	45
4.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....		47
4.1.	Escenarios analizados.....		47
4.2.	Consecuencias en el precio <i>spot</i> ante escenarios de pérdida de generación de las centrales San José y Jaguar Energy .....		47
4.3.	Afectaciones en el costo operativo del parque generador de electricidad debido a la indisponibilidad de diferentes bloques de generación .....		52

4.4.	Cambios en las transacciones internacionales debido a los escenarios de déficit energético en el parque generador de electricidad .....	57
4.5.	Demanda de electricidad desabastecida debido a la indisponibilidad de centrales térmicas que generan con base en combustibles fósiles .....	60
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	63
5.1.	¿Qué consecuencias tuvo el precio <i>spot</i> ante escenarios de pérdida de generación de las centrales San José y Jaguar Energy? .....	64
5.2.	¿Cómo se afectó el costo operativo del parque generador de electricidad debido a la indisponibilidad de diferentes bloques de generación? .....	66
5.3.	¿Qué cambios tuvieron las transacciones internacionales debido a los escenarios de déficit energético en el parque generador de electricidad? .....	67
5.4.	¿Qué cantidad de demanda de electricidad se desabasteció debido a la indisponibilidad de centrales térmicas que generan con base en combustibles fósiles? .....	68
5.5.	¿Qué repercusiones tuvo el parque generador de electricidad de Guatemala ante escenarios de pérdida de generación de las centrales San José y Jaguar Energy? .....	69
	CONCLUSIONES .....	71
	RECOMENDACIONES .....	75
	REFERENCIAS .....	77
	APÉNDICES .....	81

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Árbol de problemas .....	XXI
2.	Capacidad instalada de tecnologías renovables de generación de electricidad en época de zafra para el año 2019 en Guatemala .....	7
3.	Clasificación de las fuentes de energía.....	8
4.	Balance: generación / demanda.....	12
5.	¿Cómo se produce electricidad?.....	13
6.	Capacidad instalada del parque generador de electricidad de Guatemala incluyendo capacidad de importaciones con México .....	14
7.	Comportamiento de la curva de demanda de electricidad en Guatemala.....	16
8.	Proceso de decisión para sistemas hidrotérmicos .....	19
9.	Interfaz gráfica del nuevo corto plazo.....	20
10.	Comportamiento del precio <i>spot</i> en Guatemala .....	22
11.	Tolerancias de convergencia .....	42
12.	Comportamiento del precio <i>spot</i> para el primer escenario (SJO-C fuera de servicio).....	51
13.	Comportamiento del precio <i>spot</i> para el segundo escenario (SJO-C y JEN-C1 fuera de servicio) .....	51
14.	Comportamiento del precio <i>spot</i> para el tercer escenario (SJO-C, JEN-C1 y JEN-C2 fuera de servicio) .....	52
15.	Comportamiento del costo operativo para el primer escenario (SJO-C fuera de servicio) .....	56

16.	Comportamiento del costo operativo para el segundo escenario (SJO-C y JEN-C1 fuera de servicio) .....	56
17.	Comportamiento del costo operativo para el tercer escenario (SJO-C, JEN-C1 y JEN-C2 fuera de servicio) .....	57
18.	Demanda de electricidad desabastecida para cada escenario .....	61

## TABLAS

I.	Países con más reservas de petróleo en el mundo 2015 .....	9
II.	Clasificación del carbón mineral .....	11
III.	Interconexiones internacionales de Guatemala en 2019 .....	15
IV.	Costos operativos del parque generador de electricidad de Guatemala .....	24
V.	Definición teórica y operativa de variables.....	27
VI.	Clasificación de las variables.....	27
VII.	Escenarios de pérdida de generación.....	47
VIII.	Consecuencias en el precio <i>spot</i> para el primer escenario (SJO-C fuera de servicio) .....	48
IX.	Consecuencias en el precio <i>spot</i> para el segundo escenario (SJO-C y JEN-C1 fuera de servicio).....	49
X.	Consecuencias en el precio <i>spot</i> para el tercer escenario (SJO-C, JEN-C1 y JEN-C2 fuera de servicio).....	50
XI.	Afectaciones en el costo operativo para el primer escenario (SJO-C fuera de servicio) .....	52
XII.	Afectaciones en el costo operativo para el segundo escenario (SJO-C y JEN-C1 fuera de servicio) .....	54
XIII.	Afectaciones en el costo operativo para el tercer escenario (SJO-C, JEN-C1 y JEN-C2 fuera de servicio).....	55



XIV.	Cambios en las importaciones de electricidad con México para el primer escenario (SJO-C fuera de servicio) .....	57
XV.	Cambios en las exportaciones de electricidad con México para el primer escenario (SJO-C fuera de servicio) .....	58
XVI.	Cambios en las exportaciones de electricidad con el SER para el primer escenario (SJO-C fuera de servicio) .....	58
XVII.	Cambios en las importaciones de electricidad con México para el segundo escenario (SJO-C y JEN-C1 fuera de servicio) .....	58
XVIII.	Cambios en las exportaciones de electricidad con México para el segundo escenario (SJO-C y JEN-C1 fuera de servicio) .....	59
XIX.	Cambios en las exportaciones de electricidad con el SER para el segundo escenario (SJO-C y JEN-C1 fuera de servicio) .....	59
XX.	Cambios en las importaciones de electricidad con México para el tercer escenario (SJO-C, JEN-C1 y JEN-C2 fuera de servicio) .....	59
XXI.	Cambios en las exportaciones de electricidad con México para el tercer escenario (SJO-C, JEN-C1 y JEN-C2 fuera de servicio) .....	60
XXII.	Cambios en las exportaciones de electricidad con el SER para el tercer escenario (SJO-C, JEN-C1 y JEN-C2 fuera de servicio) .....	60
XXIII.	Demanda de electricidad desabastecida para cada escenario .....	61



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>JEN-C2</b>	Central generadora Jaguar Energy unidad dos
<b>JEN-C1</b>	Central generadora Jaguar Energy unidad uno
<b>SJO-C</b>	Central generadora San José
<b>US\$/día</b>	Dólares al día
<b>US\$/MWh</b>	Dólares por megavatio-hora
<b><math>F</math></b>	Función objetivo
<b>GW</b>	Gigavatio
<b>GWh</b>	Gigavatio-hora
<b>GWh/día</b>	Gigavatio-hora al día
<b><math>i</math></b>	Índice de sumatoria
<b><math>x_i</math></b>	i-ésima variable en estudio
<b>Kcal/kg</b>	Kilocaloría por kilogramo
<b>kUS\$</b>	Kilodólares
<b>kWh</b>	Kilovatio-hora
<b>kV</b>	Kilovoltio
<b><math>\bar{x}</math></b>	Media aritmética
<b>MW</b>	Megavatio
<b>MWh/día</b>	Megavatio-hora al día
<b>%</b>	Porcentaje
<b><math>n</math></b>	Suma de cantidad de valores de la variable
<b><math>\Sigma</math></b>	Sumatoria
<b><math>x</math></b>	Variable en estudio



## GLOSARIO

<b>AMM</b>	Administrador del Mercado Mayorista. Entidad encargada de la operación técnica y comercial del mercado mayorista en Guatemala.
<b>Cuasiexperimental</b>	Se refiere a diseños de investigación experimentales en los cuales los sujetos o grupos de sujetos de estudio no están asignados aleatoriamente.
<b>CVG</b>	Costo Variable de Generación. Es el costo en el que incurre una central generadora de electricidad al producir un megavatio-hora.
<b>Embalse</b>	Depósito de agua que se forma de manera artificial, en el cual se almacena agua de un río o de un arroyo.
<b>Encarecimiento</b>	Aumento del precio de un producto, servicio o factor económico.
<b>EOR</b>	Ente Operador Regional. Entidad encargada de la operación técnica y comercial del Mercado Eléctrico Regional.
<b>Época de zafra</b>	Época seca en que se cosecha el cultivo de caña de azúcar en el campo y se procesa en el ingenio.

<b>Exploratorio</b>	Tipo de investigación utilizada para estudiar un problema que no está claramente definido.
<b>Generación base</b>	Tecnologías de generación de electricidad que, por ser muy económicas, son despachadas la mayor parte del tiempo.
<b>Hidroeléctrica</b>	Infraestructura que utiliza la energía hidráulica para generar energía eléctrica.
<b>Indisponibilidad</b>	Tiempo durante el cual unidades generadoras permanecen fuera de servicio debido a mantenimientos programados o salidas de línea forzadas.
<b>Matriz energética</b>	Radiografía de cómo está balanceado el consumo de energía eléctrica entre distintas fuentes en un periodo de tiempo.
<b>MER</b>	Mercado Eléctrico Regional. Es el ámbito en el que se realizan las transacciones regionales de electricidad entre los agentes del mercado (Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica y Panamá).
<b>Microsoft Excel</b>	Herramienta que permite realizar tareas contables y financieras por medio de sus funciones desarrolladas específicamente para ayudar a crear y trabajar con hojas de cálculo.

<b>Muestreo</b>	Selección de un conjunto de personas o cosas que se considera representativo del grupo al que pertenecen, con la finalidad de estudiar o determinar las características del grupo.
<b>NCC</b>	Norma de Coordinación Comercial. Norma utilizada para la coordinación comercial del mercado mayorista en Guatemala.
<b>NCP</b>	Nuevo Corto Plazo. Herramienta utilizada para optimizar sistemas hidrotérmicos de generación de electricidad.
<b>Orden de mérito</b>	Forma de clasificar las fuentes de energía disponibles, especialmente la generación eléctrica, en función del orden de precios ascendente, junto con la cantidad de energía que se generará.
<b>POE</b>	Precio de Oportunidad de la Energía. Precio utilizado para valorizar las transacciones de electricidad de corto plazo.
<b>Programación</b>	Precisión del despacho de generación de un parque generador, la cual puede ser elaborada para diferentes horizontes de tiempo a futuro.
<b>PSR</b>	Power System Research. Suministrador de soluciones tecnológicas y servicios de consultoría

técnica en los sectores de energía eléctrica y de gas natural.

<b>Reservorio</b>	Sistema termodinámico que cede energía en forma de calor, trabajo o bien proporciona partículas.
<b>RRa</b>	Reserva Rápida. Servicio complementario que tiene como objetivo contar con capacidad de potencia para cubrir desbalances de generación y demanda provocados por imprevistos importantes.
<b>RRO</b>	Reserva Rodante Operativa. Servicio complementario que tiene como finalidad la regulación secundaria de frecuencia y que esté disponible para otros requerimientos operativos.
<b>SER</b>	Sistema Eléctrico Regional. Sistema eléctrico que interconecta a Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica y Panamá.
<b>Termoeléctrica</b>	Instalación empleada en la generación de energía eléctrica a partir de la energía liberada por combustibles fósiles.
<b>Univariado</b>	Análisis de cada una de las variables por separado, es decir, análisis basado en una sola variable.



**UTE**

Administrador Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas. Es la compañía estatal de energía eléctrica en Uruguay.

**Vertimiento**

Es la cantidad de agua que debe ser evacuada de los embalses por medio de los vertederos cuando la reserva sobrepasa la capacidad máxima de almacenamiento, generalmente durante las temporadas de lluvia dentro de una hidroeléctrica.



## RESUMEN

En los últimos años, el abastecimiento de electricidad en Guatemala se ha visto en riesgo por diferentes motivos, entre los que se pueden mencionar la dependencia de combustibles fósiles provenientes de otras regiones del planeta y la indisponibilidad imprevista de las centrales más grandes de generación base del país. El objetivo principal del estudio de seguridad energética fue determinar las repercusiones en el parque generador de electricidad de Guatemala ante escenarios de pérdida de generación de las centrales San José y Jaguar Energy, las cuales son de las centrales térmicas más grandes instaladas en el país y que son de generación base la mayor parte del tiempo.

Se analizaron escenarios críticos que involucraron la indisponibilidad de las centrales San José y Jaguar Energy, por medio de la simulación de despachos de electricidad, se consideró dichos escenarios y la periodicidad de arribos de combustibles fósiles al país que abastecen al resto de centrales térmicas, para luego comparar los resultados obtenidos con datos reportados en condiciones de operación normales. Entre los resultados obtenidos se pueden mencionar la desestabilización y encarecimiento del precio *spot* y del costo operativo del parque generador de electricidad de Guatemala, incremento de importaciones de electricidad y desabastecimiento de demanda de electricidad nacional y exportaciones.

Las repercusiones mencionadas representaron pérdidas económicas muy significativas para Guatemala, además del incumplimiento del abastecimiento de electricidad en el país al mínimo costo operativo posible.



## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- Contexto general

Garantizar el abastecimiento de electricidad en Guatemala es un reto constante, el cual presenta diversidad de variables que podrían llegar a afectar su cumplimiento, principalmente a dos: la indisponibilidad imprevista de las centrales térmicas más grandes de generación base y la dependencia de combustibles fósiles provenientes de otras regiones del planeta; ambas variables tratadas en el contexto del parque generador de electricidad del país.

Partiendo de la premisa anterior, es fundamental considerar que “el estudio y las políticas de seguridad energética deben tomar en cuenta el sistema energético en su conjunto y no solo alguno de sus componentes” (Rodríguez, 2018, p. 16), lo cual se traduce en el necesario monitoreo del comportamiento de las variables que influyen directamente en el abastecimiento de electricidad de los sistemas energéticos.

- Descripción del problema

Según información pública emitida por el Administrador del Mercado Mayorista, las centrales térmicas San José y Jaguar Energy representan aproximadamente el 12 % de la capacidad efectiva instalada en el parque generador de electricidad de Guatemala, además de ser generación base la mayor parte del tiempo, lo cual ocasiona que escenarios de indisponibilidad imprevista de ambas centrales, la dependencia del resto de centrales térmicas del mercado internacional de combustibles fósiles y la periodicidad de arribos

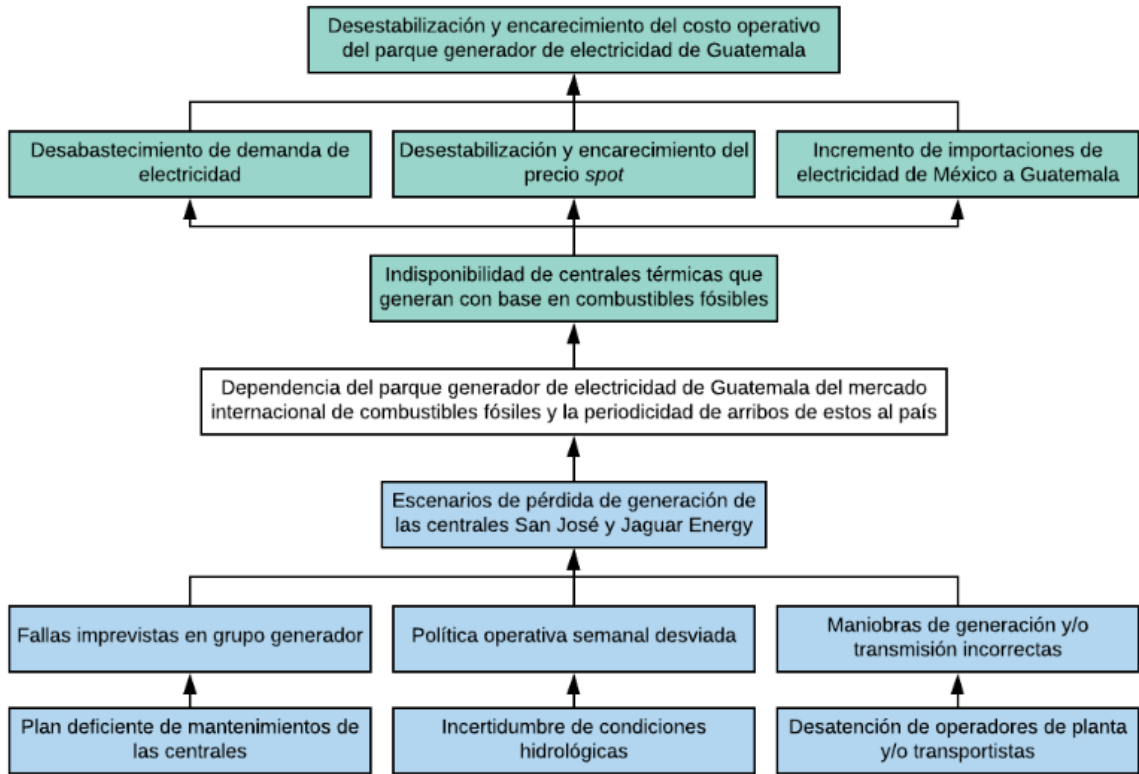
de estos al país, puedan provocar déficit de recursos energéticos para cumplir con el abastecimiento de electricidad en Guatemala y las posibles repercusiones directas y negativas en el precio *spot*, el costo operativo y en las transacciones internacionales del parque generador de electricidad.

La indisponibilidad imprevista de las centrales térmicas San José y Jaguar Energy, aunada a la dependencia de combustibles fósiles importados, es un riesgo latente que podría afectar el cumplimiento de los principales propósitos del parque generador de electricidad nacional, como lo es lograr el abastecimiento total de electricidad al mínimo costo operativo posible.

Dicho lo anterior, lograr seguridad energética en Guatemala no implicaría evitar cualquier interrupción del suministro de electricidad, ni evitar las repercusiones directas y negativas en los principales elementos del parque generador de electricidad o lograr total independencia energética; la seguridad energética en el país se podría lograr minimizando los riesgos en el cumplimiento de dicho suministro y de cierto nivel de dependencia energética, todo a un costo operativo que un país en vías de desarrollo esté dispuesto a asumir.

Por medio del siguiente esquema se lograron identificar las posibles causas y consecuencias del problema que se estudió:

Figura 1. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia.

- **Formulación del problema**

Lo anteriormente descrito dio como resultado una interrogante principal:

¿Qué repercusiones tendría el parque generador de electricidad de Guatemala ante escenarios de pérdida de generación de las centrales San José y Jaguar Energy?

El complemento que requirió la interrogante principal contempló las siguientes preguntas auxiliares:

1. ¿Qué consecuencias tendría el precio *spot* ante escenarios de pérdida de generación de las centrales San José y Jaguar Energy?
  2. ¿Cómo se afectaría el costo operativo del parque generador de electricidad debido a la indisponibilidad de diferentes bloques de generación?
  3. ¿Qué cambios tendrían las transacciones internacionales debido a los escenarios de déficit energético en el parque generador de electricidad?
  4. ¿Qué cantidad de demanda de electricidad se desabastecería debido a la indisponibilidad de centrales térmicas que generan con base en combustibles fósiles?
- Delimitación del problema

A continuación, se presenta la delimitación contextual, geográfica e histórica del problema de investigación que se estudió:

- Delimitación contextual

El estudio de seguridad energética se contextualizó en el ámbito de los escenarios de déficit energético que se han presentado en los últimos años en Guatemala y que no han sido estudiados a profundidad. Lo mencionado involucra a diversidad de variables que influyen directa e indirectamente en el cumplimiento del abastecimiento de electricidad en el país, sin embargo, el contexto analizado involucró principalmente a cuatro variables del parque generador de electricidad: precio *spot*, costo operativo, transacciones internacionales y demanda.



- Delimitación geográfica

Para el estudio se utilizaron datos del parque generador de electricidad de Guatemala y de transacciones internacionales de electricidad con México y Centroamérica, por lo que la delimitación geográfica se fundamentó en Guatemala y en el comportamiento de su parque generador de electricidad con países vecinos.

- Delimitación histórica

Se realizó la delimitación histórica por decisión del investigador, ya que el estudio realizado fue el primero de esta índole en Guatemala, por lo que se empleó el muestreo no probabilístico para realizar la delimitación histórica de la temática por tratar, tomando como base el comportamiento del parque generador de electricidad de Guatemala en los últimos tres años.



## OBJETIVOS

### General

Determinar las repercusiones en el parque generador de electricidad de Guatemala ante escenarios de pérdida de generación de las centrales San José y Jaguar Energy.

### Específicos

1. Estimar las consecuencias en el precio *spot* ante escenarios de pérdida de generación de las centrales San José y Jaguar Energy.
2. Cuantificar las afectaciones en el costo operativo del parque generador de electricidad debido a la indisponibilidad de diferentes bloques de generación.
3. Establecer los cambios en las transacciones internacionales debido a los escenarios de déficit energético en el parque generador de electricidad.
4. Calcular la cantidad de demanda de electricidad desabastecida debido a la indisponibilidad de centrales térmicas que generan con base en combustibles fósiles.



## RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

- **Diseño:** el diseño que se adoptó fue cuasiexperimental, ya que se manipularon variables independientes y otras fueron dependientes, es decir, no se poseía el control total sobre las variables que se analizaron en el presente estudio de seguridad energética.
- **Enfoque:** el enfoque fue cuantitativo, ya que se utilizaron diferentes procedimientos para medir las repercusiones que tuvo el parque generador de electricidad de Guatemala ante escenarios de pérdida de generación de las centrales San José y Jaguar Energy, por lo cual el estudio realizado también fue de causalidad.
- **Alcance:** el alcance fue exploratorio, ya que el estudio realizado se centró en analizar aspectos concretos de la realidad de la seguridad energética del parque generador de electricidad de Guatemala que no habían sido analizados aún a profundidad.
- **Unidad de análisis:** la unidad de análisis que se estudió fue el parque generador de electricidad de Guatemala, que se divide principalmente en centrales generadoras de diferentes tipos de tecnología, importaciones de electricidad provenientes de países vecinos y demanda de electricidad que debe abastecerse.
- **Variables principales:** las variables que se analizaron principalmente fueron demanda de electricidad, precio *spot*, costo operativo e

importaciones de electricidad, todas en el contexto del parque generador de electricidad de Guatemala.

A continuación, se presentan las fases del estudio y las técnicas de análisis de información:

- Fase 1: en esta fase se realizó la búsqueda, revisión y consulta de fuentes bibliográficas relacionadas con la temática tratada.
- Fase 2: en esta fase se determinó las consecuencias en el precio *spot* por medio de la comparación entre el precio *spot* promedio diario programado de los días analizados y el precio *spot* promedio diario de los resultados obtenidos.
- Fase 3: en esta fase se determinó las afectaciones que tuvo el costo operativo al realizar la comparación entre el costo operativo programado de los días analizados y el costo operativo de los resultados obtenidos.
- Fase 4: en esta fase se determinó los cambios en las transacciones internacionales de electricidad que realiza Guatemala con países vecinos, comparando los datos programados de los días analizados y los resultados obtenidos.
- Fase 5: en esta fase se determinó la demanda de electricidad desabastecida al totalizar los resultados obtenidos para cada escenario analizado, además de su valorización monetaria.
- Técnicas de análisis de información: para las simulaciones de despachos de electricidad realizados, se utilizó la tolerancia de convergencia determinada por el investigador (tolerancia de 1 kUS\$ y 0.1 %), para luego analizar los datos obtenidos considerando su variación total y porcentual respecto a datos en condiciones normales de operación.

## INTRODUCCIÓN

La seguridad energética en Guatemala es una temática que prácticamente no había sido tratada, lo cual favoreció este estudio en el que se evaluaron escenarios de déficit de recursos energéticos para determinar y presentar las repercusiones e implicaciones en las que incurrió el parque generador de electricidad ante dichos escenarios.

En este estudio de seguridad energética se presentó y evaluó dos de las posibles causas de déficit energético en Guatemala, las cuales han dado de que hablar en los últimos años: la dependencia de las centrales térmicas del mercado internacional de combustibles fósiles y la periodicidad de arribos de estos al país, además de la indisponibilidad imprevista de grandes bloques de generación, que son base la mayor parte del tiempo para el abastecimiento de electricidad del país, como lo son las centrales San José y Jaguar Energy.

La realización del primer estudio de seguridad energética de Guatemala implicó diversidad de aspectos positivos que podrán contribuir con mejorar la confiabilidad en el suministro de electricidad en el país, lo cual es fundamental para que un país en vías de desarrollo pueda continuar creciendo en todos los ámbitos en los que la electricidad juega un papel importante, como es la economía y todas las actividades que le conciernen.

En el primer capítulo del estudio se trató de contextualizar al lector por medio de la presentación de los antecedentes asociados a la conceptualización de la temática del estudio de seguridad energética realizado, lo cual tuvo como

fin dar a conocer la necesidad de realizar un estudio de esta índole para el parque generador de electricidad de Guatemala.

En el segundo capítulo se proporcionó la información teórica y que fue el cimiento para conceptualizar y fundamentar la obtención de la información que se utilizó para el estudio, como fue la selección de los escenarios utilizados y la obtención de los resultados, lo cual también fue de gran utilidad para determinar las conclusiones y recomendaciones con base en la teoría que se presentó y la experiencia del investigador, todo partiendo de la presentación del significado de seguridad energética.

En el tercer capítulo se presentó el procedimiento utilizado para la obtención de resultados, partiendo de las características del estudio, continuando con la presentación de las variables que se estudiaron, las fases del estudio que se realizó, además de las consideraciones más importantes para el establecimiento de los escenarios estudiados, lo cual también involucró la obtención de los datos utilizados como insumos y finalizando con la presentación de la tolerancia correspondiente a los resultados obtenidos y los métodos de análisis de la información. Cabe mencionar que este capítulo fue el principal preámbulo para los capítulos finales, donde se presentaron los resultados y fueron discutidos.

En el cuarto capítulo se presentaron los resultados obtenidos en el estudio realizado, los cuales se obtuvieron con base en las preguntas de investigación, los objetivos y las diferentes fases de estudio del trabajo de graduación; adicionalmente de los resultados correspondientes a los objetivos específicos y del objetivo general, se presentaron los resultados correspondientes a los escenarios seleccionados de pérdida de generación de las centrales San José y Jaguar Energy.



En el quinto capítulo, se discutieron los resultados obtenidos, sección que fue de suma importancia para el entendimiento general del estudio realizado, debido a que se describen las premisas con las cuales se obtuvieron los resultados correspondientes, además de la explicación textual de estos. A continuación, se presenta el primer estudio de seguridad energética realizado para el parque generador de electricidad de Guatemala, el cual se espera tenga impactos positivos en los lectores y pueda contribuir de buena manera en el desarrollo eléctrico y económico del país.



## **1. MARCO REFERENCIAL**

El objetivo principal del presente marco referencial fue recopilar los antecedentes que se utilizaron en este estudio de seguridad energética, lo cual resultó ser muy útil para el investigador por el hecho de que se lograron identificar vacíos e interrogantes por explotar para la debida justificación del estudio realizado.

### **1.1. Estudios previos**

En cuanto a estudios previos relacionados a seguridad energética en Guatemala, cabe mencionar que el presente estudio es de índole pionero en el país. Sin embargo, fue muy importante presentar antecedentes asociados a la conceptualización de la temática tratada, lo cual tuvo como fin dar a conocer la necesidad de realizar un estudio de seguridad energética para el parque generador de electricidad del país, para evaluar escenarios críticos, actividad de suma importancia, que no ha sido estudiada.

### **1.2. Antecedentes**

Molina, Martínez y Rudnick (2005) afirman que garantizar el abastecimiento de electricidad es una materia compleja que posee gran diversidad de variables de carácter político, económico y ambiental, lo que provoca que la seguridad de suministro energético se convierta en una temática esencial de evaluación para la sostenibilidad económica y social de los países del mundo, además de aumentar la posibilidad de que en estos se puedan satisfacer la mayoría de necesidades básicas, para lo cual es indispensable

garantizar la existencia de las fuentes primarias que permitan el desarrollo de estas.

Actualmente para Guatemala es fundamental contar con seguridad energética, ya que un país en vías de desarrollo lo requiere para continuar la constante lucha de crecimiento en todo aspecto, sobre todo para reducir la dependencia de los recursos energéticos que se obtienen fuera de sus fronteras y así garantizar el suministro de electricidad para todos sus consumidores.

Escribano (2014) plantea que un elemento que podría ser clave para proveer seguridad energética es el papel de las fuentes renovables de energía, ya que dichas fuentes se sitúan en el centro del debate entre el aseguramiento del suministro de electricidad y seguridad económica.

Si bien es cierto, la política energética puede llegar a proponerse e incluso ordenarse en cualquier país, ha llegado a considerar excesos y errores regulatorios y de planificación que han elevado el costo económico de las energías renovables por encima de lo que puede ser viable en un contexto de crisis económica, como en ocasiones ha sido el caso de Guatemala, pero una vez instaladas y operando, el orden de mérito resulta muy sólido (prioridad de energías con costos cercanos a cero, como es el caso de las energías renovables).

En Guatemala se considera que la matriz energética se encuentra diversificada a tal punto que el balance constante entre generación y demanda de electricidad se sustenta en todo momento, ya que la variedad de tecnologías de generación de electricidad brinda el respaldo necesario cuando la incertidumbre y variabilidad de las energías renovables se hacen presentes, lo que hace que las tecnologías que dependen de combustibles fósiles tengan un

porcentaje muy considerable de participación durante la mayor parte del tiempo para asegurar el abastecimiento de electricidad, lo que no deja de ser un riesgo latente debido a la dependencia del mercado internacional de combustibles fósiles y la periodicidad de arribos de estos al país.

España es un gran ejemplo, si de sistemas eléctricos grandes y potentes se refiere, por lo que Ruiz (2007) menciona que las agencias especializadas señalan que los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) continuarán siendo la fuente que predomine en la matriz energética global durante las próximas décadas, lo que provocará que se cree un contexto en el que la producción y suministro de dichos combustibles fósiles sea acechado por un paradigma de precios elevados, elevada volatilidad, tensiones políticas, alto debate ambiental a nivel internacional, entre otros aspectos conflictivos.

Guatemala, pese a ser un país muy pequeño comparado con España, tanto geográficamente como eléctricamente, presenta muchas similitudes en cuanto a la diversificación de la matriz energética, por lo que se puede hacer énfasis en el comportamiento de la matriz energética de España para conocer ciertos riesgos que pueden presentarse debido a la predominancia de tecnologías a base de combustibles fósiles con las que cuenta el país.

Como contraparte positiva, Ruiz (2007) indica que América Latina y el Caribe poseen en su conjunto, un superávit considerable en producción de combustibles crudos y gas, sin embargo, los recursos energéticos de la región se encuentran distribuidos no de manera uniforme. Es por esta razón que se han intentado realizar propuestas que tienen como fin garantizar el suministro de los recursos energéticos e impulsar el desarrollo de energías renovables y su uso eficiente, hecho que pudiera ser de gran ayuda para Guatemala y así aumentar la seguridad energética en el país.

Blanco, Zúñiga, Torre, Arce, Martínez, Quiros y otros (2015) indican que uno de los objetivos de los procesos de independencia y liberalización de los mercados de energía es alcanzar un suministro energético seguro, por lo que, de manera general, se puede definir a la seguridad de suministro energético como la seguridad que involucra obtener electricidad a un nivel de precios que los consumidores estén dispuestos a pagar.

Por otra parte, la importancia que posee el suministro de electricidad se refleja en el hecho de que en la actualidad la mayoría de las actividades productivas requieren electricidad, desde la producción de equipos y maquinarias, pasando por el vestuario y el calzado, la producción y empaque de alimentos, hasta el bombeo de agua potable a las viviendas. Todo lo mencionado anteriormente hace referencia a la necesidad del suministro de electricidad, por lo tanto, el desarrollo de un país depende del desarrollo y estabilidad de su sistema eléctrico.

Fue muy importante tomar en consideración lo indicado por Rodríguez (2018) para la realización del primer estudio de seguridad energética del parque generador de electricidad de Guatemala, ya que se pretendía evidenciar la necesidad de contar con dicha seguridad en el país:

Para lograr ese propósito se requiere minimizar amenazas que pesan sobre la producción, el suministro y el consumo. Pero no solo se trata de reducir riesgos, sino de hacerlo atendiendo a preocupaciones legítimas de la sociedad como son el respeto de los derechos humanos, la economía, la preservación del medio ambiente local y global, así como el respeto a las actividades y valores de las comunidades aledañas a la infraestructura energética. Detrás de la apariencia técnica y económica de la seguridad energética se encuentra la noción de seguridad nacional. (p. 15)

## **2. MARCO TEÓRICO**

La temática que se trató en el estudio de seguridad energética del parque generador de electricidad de Guatemala, se pudo haber encontrado dentro de muchos ámbitos que le conciernen al cumplimiento del abastecimiento de electricidad en el país, sin embargo, se abarcaron aspectos fundamentales y específicos que fueron de mucha utilidad y esclarecimiento para la determinación, presentación y estudio de los resultados, conclusiones y recomendaciones, no solo para el investigador, sino también para los lectores en general y para los interesados en el aseguramiento del suministro energético en Guatemala.

Se trataron cinco temáticas que fueron la base para la introducción teórica del estudio realizado, en las que no podía faltar la conceptualización de la seguridad energética a nivel general para su entendimiento y análisis, seguido de los recursos energéticos no renovables que impactan directamente en el abastecimiento de electricidad del país. Las siguientes dos temáticas consideraron las características y modelación de los parques generadores de electricidad y lo asociado al abastecimiento de demanda electricidad al mínimo costo posible. Finalmente, se trataron los conceptos asociados a indicadores económicos de electricidad, los cuales fueron de gran importancia para la obtención y presentación de los resultados del estudio realizado.

### **2.1. Seguridad energética**

Es fundamental considerar que “los países necesitan garantizar la disponibilidad de combustibles y electricidad a un precio abordable. No extraña

entonces que la seguridad energética esté en la cúspide de los objetivos de la política pública de todos los países, ricos y pobres” (Rodríguez, 2018, p. 25), por lo que se tomaron en consideración conceptos de suma importancia para la elaboración del presente estudio de seguridad energética, los cuales se presentan a continuación.

### **2.1.1. Concepto de seguridad energética**

La Energy International Agency (citado por Rodríguez, 2018) menciona que “la seguridad energética es la disponibilidad ininterrumpida de fuentes de energía a un precio asequible” (p. 27), mientras que APERC (citado por Rodríguez, 2018), indica que “la seguridad energética es la capacidad de una economía para garantizar la disponibilidad de energéticos de manera sostenible y oportuna, con precios que no afecten negativamente el desempeño económico” (p. 27) y Cherp y Jewwell (citado por Rodríguez, 2018), aseguran que “la seguridad energética es simplemente la baja vulnerabilidad de los sistemas energéticos vitales” (p. 27), como los concernientes a los combustibles fósiles y a la electricidad.

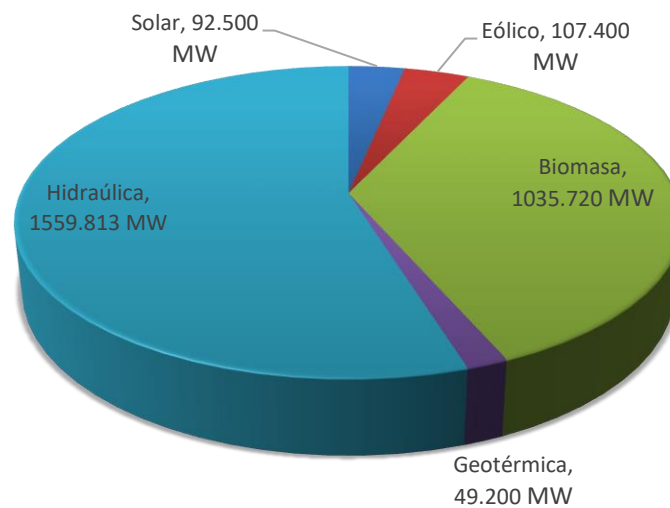
### **2.1.2. Diversificación energética**

Cuando se trata la temática relacionada a la diversificación energética, se deben de tomar en cuenta las razones del surgimiento de este concepto; es por esta razón que Martínez (2017) menciona que, siempre en el plano energético, respecto al desarrollo sostenible, actualmente se agrega una nueva preocupación a la escasez, que es el cambio climático provocado por el consumo energético con base en combustibles fósiles.



Es por esta razón que Barredo (citado por Martínez, 2017) define a la diversificación energética como el hecho de construir “un nuevo modelo energético progresivamente independiente de los combustibles fósiles, para evitar las graves consecuencias del cambio climático y garantizar un suministro energético más seguro, estable y competitivo” (p. 41), es decir, un modelo energético con base en tecnologías renovables de generación de electricidad.

Figura 2. **Capacidad instalada de tecnologías renovables de generación de electricidad en época de zafra para el año 2019 en Guatemala**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Administrador del Mercado Mayorista (2002). *Norma de coordinación comercial No. 4 precio de oportunidad de la energía.*

### 2.1.3. Seguridad energética en sistemas eléctricos

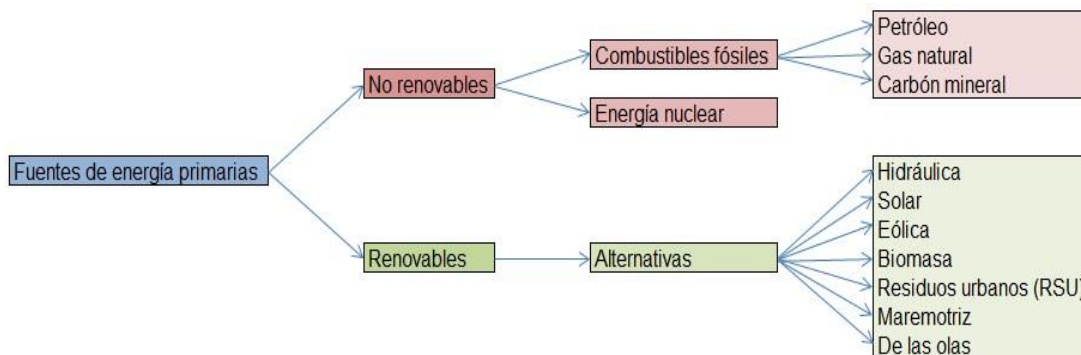
Según Rodríguez (2018), la seguridad energética en sistemas eléctricos “presenta claro oscuros: por una parte, se observa una elevada y creciente

dependencia del consumo de combustibles fósiles, sin embargo, tiende a disiparse el riesgo de interrupción del suministro tanto en generación como en transmisión y distribución” (p. 79). Por lo mencionado anteriormente, es común observar que las matrices energéticas de muchos países en el mundo se encuentran diversificadas a tal punto que las tecnologías que generan electricidad a base de combustibles fósiles son las encargadas de brindar estabilidad, seguridad y confiabilidad a los sistemas eléctricos, como se observó para el caso de Guatemala en el estudio de seguridad energética realizado.

## 2.2. Recursos energéticos no renovables

Las fuentes de energía son los recursos naturales que tienen la capacidad de producir energía, las cuales se pueden dividir en dos grupos:

Figura 3. **Clasificación de las fuentes de energía**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE, 2017). *Energías no renovables*.

- No renovables: son las fuentes de energía que se agotan cuando transforman su energía en energía útil.

- Renovables: a diferencia de las no renovables, estas fuentes de energía no se agotan incluso después de que su energía fue transformada en energía útil.

Es importante considerar que la formación y acumulación del petróleo, gas natural y el carbón mineral “son procesos que duran entre centenares de miles de años hasta millones de años. Por lo tanto, son recursos no renovables” (Martínez, 2017, p. 7), porque los reservorios de estos recursos no pueden aumentar.

### 2.2.1. Petróleo

El petróleo se considera según UTE (2017) como “una mezcla heterogénea de hidrocarburos y compuestos químicos que contienen principalmente Carbono e Hidrógeno, formados naturalmente en yacimientos subterráneos de roca sedimentario” (p. 19).

Adicionalmente, UTE (2017) menciona que en el mundo existen reservorios naturales de petróleo, los cuales están conformados por una gran cantidad de rocas, y entre las cuales, es decir, los espacios entre ellas, se encuentra petróleo en gran cantidad. Este tipo de rocas se conoce comúnmente como “rocas almacén” (p. 10), ya que en estas se acumula el petróleo; estas pueden tener una superficie porosa y permeable, por lo que “podemos imaginar un reservorio de petróleo como un enorme recipiente lleno de bolitas, con petróleo en los espacios entre las mismas” (UTE, 2017, p. 11).

Tabla I. Países con más reservas de petróleo en el mundo 2015

No.	País	Petróleo - reservas comprobadas [barriles]
1	Venezuela	298,400,000,000
2	Arabia Saudita	268,300,000,000

Continuación tabla I.

No.	País	Petróleo - reservas comprobadas [barriles]
3	Canadá	171,000,000,000
4	Irán	157,800,000,000
5	Irak	144,200,000,000
6	Kuwait	104,000,000,000

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Martínez (2017). *La diversificación energética en Colombia desde la política pública.*

### 2.2.2. Gas natural

Según UTE (2017), el gas natural “procede de la descomposición de los sedimentos de materia orgánica atrapada entre estratos rocosos, y es una mezcla de hidrocarburos ligeros compuesta principalmente por metano, etano, propano, butanos y pentanos, variando de acuerdo a los diferentes yacimientos” (p. 11), que se dividen en yacimientos asociados o no asociados, dependiendo si estos se encuentran o no mezclados con el petróleo.

Es importante hacer ver que “el gas natural es la fuente de energía fósil que ha tenido mayor desarrollo en las últimas décadas” (UTE, 2017, p. 12), lo cual contribuye a que en Guatemala actualmente se estén realizando actividades exploratorias y de explotación del recurso. El gas natural está ubicado en la actualidad como “la segunda fuente energética más consumida en el mundo después del petróleo principalmente porque desde el punto de vista ambiental, posee una ventaja frente a otros combustibles fósiles” (UTE, 2017, p. 13).

### 2.2.3. Carbón mineral

El primer combustible fósil utilizado por la humanidad fue el carbón mineral, el cual posee gran cantidad de reserva alrededor de todo el mundo, “pero mayormente en el hemisferio norte (principalmente en China, Rusia, Europa y Estados Unidos)” (UTE, 2017, p. 15). Este combustible fósil está “formado por sustancias vegetales desde hace millones de años” (UTE, 2017, p. 15), el cual “es utilizado en todas partes del mundo para producir energías. Muchas centrales energéticas queman carbón para producir electricidad. El carbón ardiente transforma el agua en vapor para hacer funcionar las turbinas” (UTE, 2017, p. 15).

En Guatemala existe gran variedad de centrales que producen electricidad con base en carbón mineral, como San José y Jaguar Energy, que son las más grandes del país, con 420 MW aproximadamente de capacidad efectiva instalada entre ambas centrales.

Tabla II. **Clasificación del carbón mineral**

<b>Tipo</b>	<b>Antracita</b>	<b>Hulla</b>	<b>Lignito</b>	<b>Turba</b>
Porcentaje de carbono	95 %	85 %	75 %	50 %
Poder calorífico (kcal/kg)	8000	7000	6000	2000
Procedencia	Era primaria	Era primaria	Era secundaria	Muy reciente

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE, 2017). *Energías no renovables*.

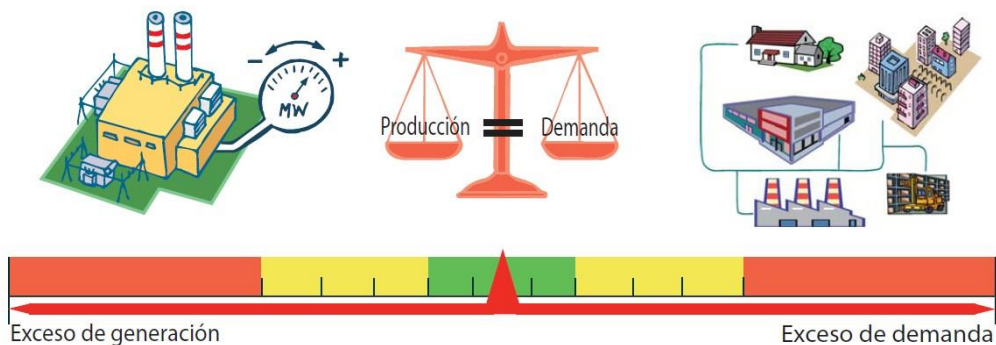
### 2.3. Parques generadores de electricidad

Los parques generadores de electricidad tienen como razón de ser generar electricidad para abastecer la demanda de esta. En la actualidad es muy común que en muchos países los parques generadores de electricidad, además de las centrales de generación instaladas dentro de sus fronteras, también hagan uso de las interconexiones con países vecinos para importar electricidad y así aportar al abastecimiento de la demanda de esta.

Los parques generadores de electricidad se componen principalmente de tres elementos:

- Centrales generadoras de electricidad de diferentes tecnologías,
- Importaciones de electricidad provenientes de países vecinos, y
- Demanda de electricidad que debe abastecerse.

Figura 4. **Balance: generación / demanda**



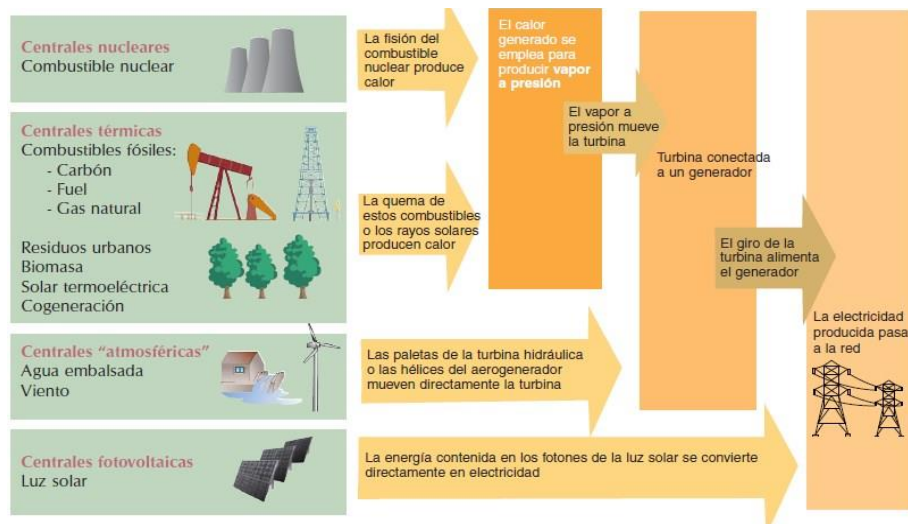
Fuente: Red Eléctrica de España (2009). *El suministro de electricidad*.

### 2.3.1. Tecnologías de generación de electricidad

La electricidad, según Red Eléctrica de España (2009), se define como “un fenómeno natural que está presente en muchos ámbitos de la vida. Sin embargo, para aprovecharla como forma de energía debe obtenerse artificialmente en las centrales eléctricas” (p. 5) de diferentes tecnologías, para luego consumirse.

La electricidad, al “no tratarse de una fuente de energía primaria como el petróleo, el carbón o el gas natural” (Red Eléctrica de España, 2009, p. 6), debe de “generarse a partir de la transformación de estos recursos energéticos de origen fósil o de recursos energéticos renovables como el sol, el viento, el agua y la biomasa, o el uranio en las centrales nucleares” (Red Eléctrica de España, 2009, p. 6). Por lo mencionado anteriormente la electricidad es considerada como una fuente de energía, pero del tipo secundaria.

Figura 5. ¿Cómo se produce electricidad?

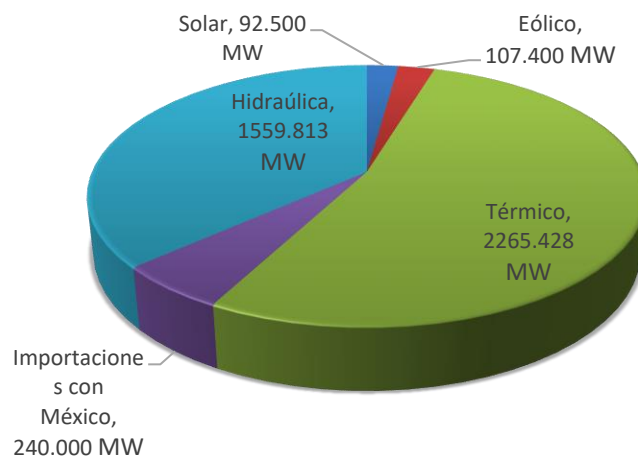


Fuente: Red Eléctrica de España (2009). *El suministro de electricidad*.

En la actualidad existen muchos tipos de centrales generadoras de electricidad, “sin embargo, su capacidad de producción y su nivel de eficiencia (es decir, la cantidad de electricidad que pueden obtener a partir de la transformación del recurso primario), depende del potencial energético de la fuente utilizada” (Red Eléctrica de España, 2009, p. 6), pero también de la tecnología utilizada.

Generalmente, a diferencia de las centrales solares, la gran mayoría de centrales de generación de electricidad “se basan en dos elementos clave que son necesarios para conseguir esa transformación: la turbina, que transforma el calor o el movimiento producido por la fuente de energía primaria en energía mecánica, y el generador” (Red Eléctrica de España, 2009, p. 6), es el encargo de convertir la energía del tipo mecánica que produce la turbina en electricidad.

Figura 6. **Capacidad instalada del parque generador de electricidad de Guatemala incluyendo capacidad de importaciones con México**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Administrador del Mercado Mayorista (2000). *Norma de coordinación comercial No. 4 precio de oportunidad de la energía.*



### 2.3.2. Importaciones de electricidad

En términos generales, “las transacciones internacionales de electricidad obedecen a convenios internacionales y se armonizan con la regulación para el funcionamiento hacia el mercado interno” (Saavedra, 2016, p. 14), lo cual abarca las transacciones internacionales de importación y exportación de electricidad. En cuanto a las importaciones, Saavedra (2016) menciona que “las ofertas internacionales se toman como una oferta más para el despacho ideal” (p. 14) de los parques generadores de electricidad.

Tabla III. **Interconexiones internacionales de Guatemala en 2019**

<b>Interconexión</b>	<b>País de enlace</b>
Tapachula - Los Brillantes 400 kV	México
Panaluya - La Entrada 230 kV	Honduras
Moyuta - Ahuachapán 230 kV	El Salvador
La Vega II - Ahuachapán 230 kV	El Salvador

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Administrador del Mercado Mayorista (2002). *Norma de coordinación comercial No. 10 exportación e importación de energía eléctrica.*

También es importante mencionar que la “interconexión entre sistemas eléctricos permite garantizar el suministro eléctrico en un determinado territorio cuando un sistema en concreto no puede generar energía suficiente para cubrir la demanda” (Red Eléctrica de España, 2009, p. 5), por lo cual, mientras “más interconectados estén los sistemas eléctricos y mayor sea su capacidad de intercambio de energía, mayor será también la seguridad y calidad de servicio que proporcione” (Red Eléctrica de España, 2009, p. 5).

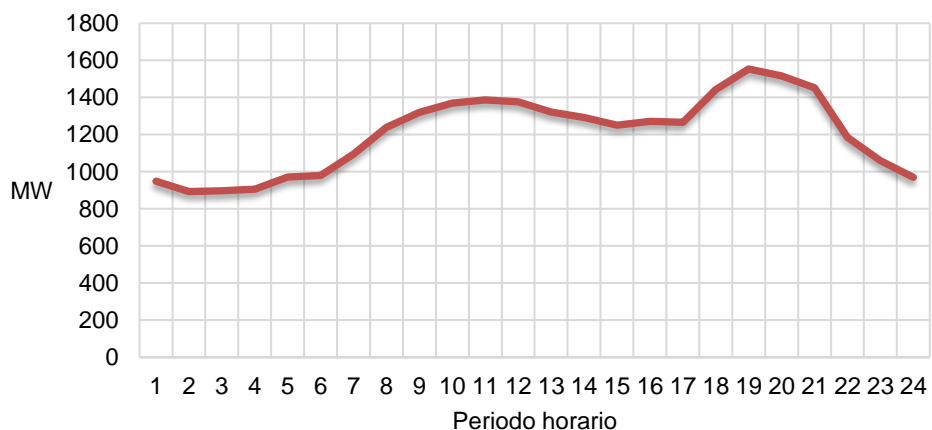
El Administrador del Mercado Mayorista (2002), en el ámbito guatemalteco, define a las importaciones de electricidad como la “actividad por medio de la cual el Mercado Mayorista de Guatemala recibe y compra de otro

país Energía Eléctrica producida con unidades o Centrales generadoras instaladas en un país diferente a Guatemala” (p. 3); dicha actividad es considerada como generación disponible en el nodo de interconexión del SIN de Guatemala con el país vecino.

### 2.3.3. Demanda de electricidad

En las sociedades se “demanda en cada instante electricidad para producir bienes en las fábricas, desarrollar la actividad de comercios y empresas y también para alimentar la vida de los hogares” (Red Eléctrica de España, 2009, p. 13). La Red Eléctrica de España (2009) explica que “la electricidad no es almacenable económicamente, en el transcurso del día se van produciendo cambios del requerimiento de esta, lo que da origen a la curva de demanda de un parque generador de electricidad” (p. 13).

Figura 7. **Comportamiento de la curva de demanda de electricidad en Guatemala**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Administrador del Mercado Mayorista (2000). *Norma de coordinación comercial No. 4 precio de oportunidad de la energía.*

Durante las horas de demanda máxima de electricidad es más costosa la producción de esta, ya que se convocan a generar a las centrales más caras.

## **2.4. Despacho económico de electricidad**

Leal (2005) parte de la PLP (Planificación de Largo Plazo) para conceptualizar las características de despacho económico de electricidad, el cual se encarga de determinar la programación de carácter horario, económico, además de confiable de cada una de las unidades generadoras de un parque generador de electricidad. También se debe mencionar que “el despacho económico determina la salida de potencia activa de cada planta generadora, necesaria para alimentar la carga del sistema, minimizando el costo operativo total, respetando criterios de calidad del servicio (frecuencia y voltaje)” (Leal, 2005, p. 11) del parque generador de electricidad estudiado.

### **2.4.1. Programación lineal**

La programación lineal “es el conjunto de técnicas matemáticas que pretende optimizar (maximizar o minimizar) una función objetivo del tipo lineal de varias variables, sujeta a una serie de restricciones expresadas por inecuaciones lineales” (Leal, 2005, p. 13). Desde el punto de vista de aplicación, Felipe (2016) menciona que “la solución a un problema de programación lineal consiste en elegir el nivel de cada una de las actividades que compiten para realizar la operación óptima de un sistema, considerando los recursos que utilizará cada actividad” (p. 62), como lo fueron los recursos energéticos de las tecnologías de generación que se utilizaron en las simulaciones de despacho de electricidad realizadas.

La herramienta NCP (Nuevo Corto Plazo), que se presentará más adelante, utilizó programación lineal para realizar la optimización de los despachos de electricidad, tomando en consideración los escenarios que se deseaban analizar. Para el caso del estudio realizado, los insumos que se ingresaron al NCP y que fueron optimizados por medio de programación lineal, consideraron los escenarios óptimos y también los asociados a condiciones de déficit energético que se seleccionaron partiendo de los últimos tres años de historia del parque generador de electricidad de Guatemala.

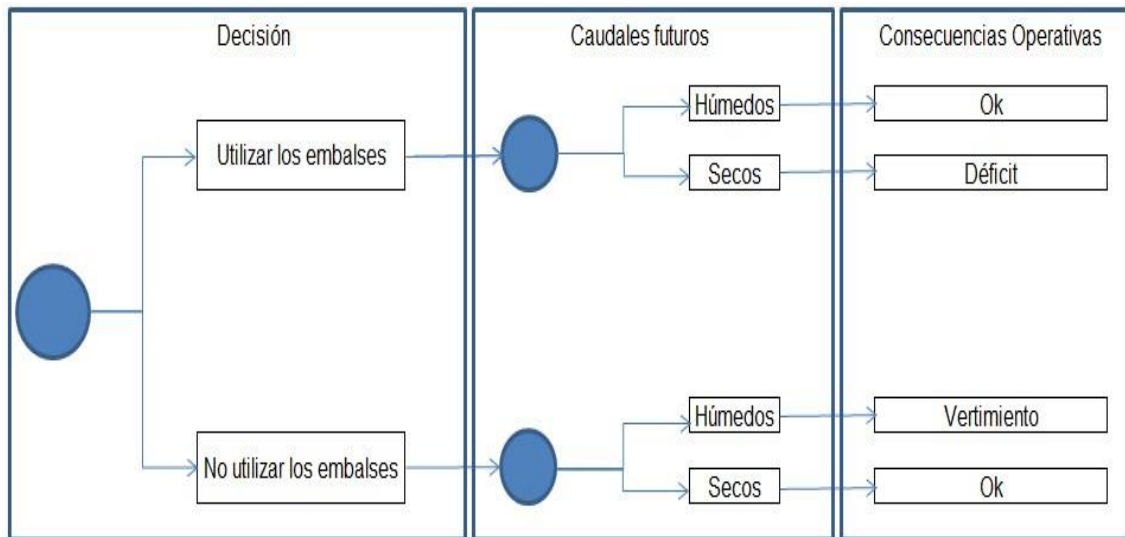
#### **2.4.2. Función objetivo**

Conceptualmente hablando, Sontay (2011) define a la función objetivo como la “medida cuantitativa del funcionamiento del sistema que se desea optimizar (maximizar o minimizar). Como ejemplo de funciones objetivos se pueden mencionar: el caso del sistema eléctrico guatemalteco que es la minimización de los costos variables de operación del sistema hidrotérmico” (p. 45). Mientras que, desde el punto de vista matemático, Leal (2005) menciona que “la función  $F = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_jx_j$  es llamada *función objetivo* y que es necesario optimizar. En esa expresión  $x_1, x_2, \dots, x_j$  son las variables de decisión, mientras que  $a_1, a_2, \dots, a_j$  son constantes” (p. 14).

La programación lineal que utilizó el NCP para realizar los despachos de electricidad contaba con una función que se debía de optimizar, lo cual debía maximizar o minimizar ingresos o costos respectivamente. Para el caso del estudio realizado, los despachos que se realizaron con el NCP optimizaron los recursos energéticos para cada escenario, lo cual involucró minimizar el costo en el que incurrió el parque generador de electricidad para abastecer la demanda nacional de electricidad y las exportaciones. Dicho lo anterior, el NCP utilizó programación lineal para optimizar los recursos energéticos insumos para

cada despacho, lo que dio como resultado el costo operativo de dichos despachos, para lo cual se utilizó la función objetivo.

Figura 8. **Proceso de decisión para sistemas hidrotérmicos**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Felipe (2016). *Optimización del despacho de generación para corto plazo con simulación de escenarios en época seca y época lluviosa, considerando la incorporación de centrales eólicas al SNI de Guatemala.*

### 2.4.3. Herramienta nuevo corto plazo

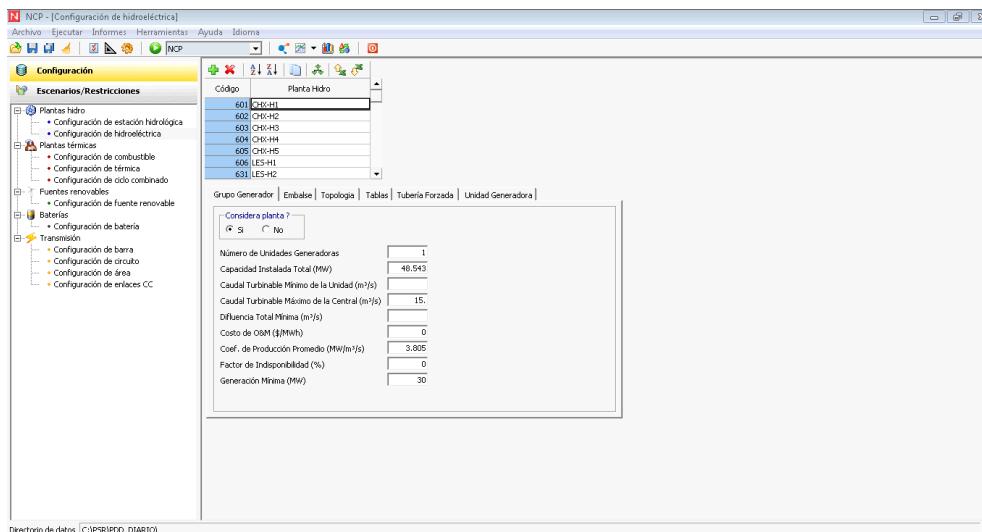
Power System Research (PSR) en su Manual de Usuario, describe al Nuevo Corto Plazo o NCP como:

Un modelo de programación lineal entero-mixta que tiene el objetivo de determinar el despacho óptimo (mínimo costo o máximo ingreso) de un sistema eléctrico compuesto por plantas hidroeléctrica y termoeléctrica, en

etapas horarias, de 30 minutos o de 15 minutos, para un horizonte de hasta 31 días. (PSR, 2019, p. 1)

El NCP es la herramienta que utiliza el AMM para realizar las programaciones de despachos de generación de carácter mensual, semanal y diario, así como las reprogramaciones que pudieran requerirse. Dicha herramienta es muy amigable, por lo que fue de gran utilidad en la realización del estudio de seguridad energética, además del conocimiento del investigador para el uso del NCP, lo cual en conjunto permitió obtener resultados confiables y lo más verídicos posibles.

Figura 9. Interfaz gráfica del nuevo corto plazo



Fuente: elaboración propia.

## 2.5. Indicadores económicos de electricidad

Existen diversidad de indicadores económicos concernientes a la electricidad, ya sean de producción, demanda o valorización de esta en general,

que son de gran utilidad para analizar el comportamiento de un parque generador de electricidad, independientemente de los escenarios en los que este esté operando. Principalmente se puede hablar del precio *spot* para valorizar transacciones de electricidad, el costo operativo que corresponde al costo de operar todo el parque generador de electricidad y los costos variables de generación que representan los costos en los que incurre una central generadora para producir electricidad.

### **2.5.1. Precio *spot***

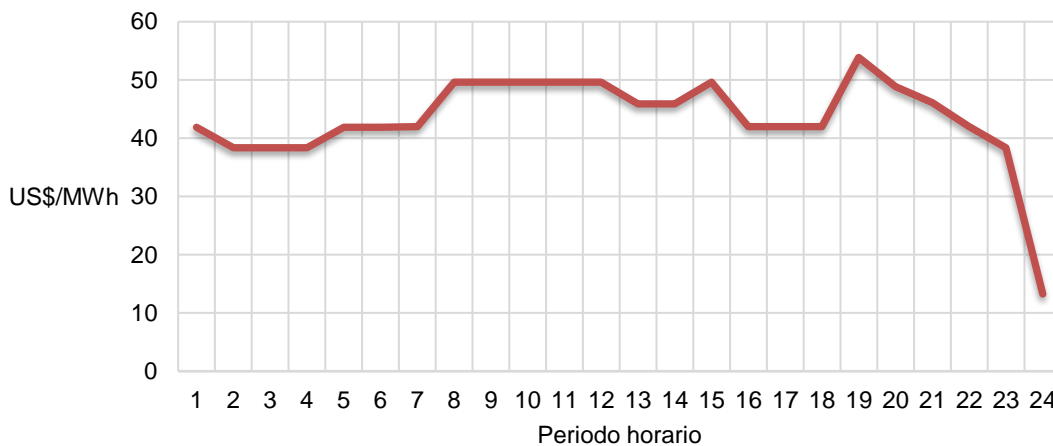
Según la NCC no. 4, en su Artículo 1, el precio *spot* o POE se define como:

El valor del Costo Marginal de Corto Plazo de la Energía en cada hora, definido como el costo en que incurre el Sistema Eléctrico para suministrar un kilovatio-hora (kWh) adicional de energía a un determinado nivel de demanda de potencia y considerando el parque de generación y transmisión efectivamente disponible. El Costo Marginal de Corto Plazo corresponde al máximo costo variable de las unidades generadoras, en el Nodo de Referencia, que fueron convocadas por el Despacho Económico y resultaron operando en función de su costo variable de acuerdo al resultado del despacho diario, respetando los requerimientos de Servicios Complementarios. (Administrador del Mercado Mayorista, 2000, p. 2)

Tanto en la NCC no. 4 y en la no. 1 se detalla la metodología de cálculo del precio *spot* en Guatemala, lo cual fue de gran utilidad para automatizar el proceso para la determinación de dicho precio. Es importante mencionar que el investigador poseía el conocimiento necesario para verificar el comportamiento del precio *spot* ante escenarios óptimos o de déficit energético, por lo que se

lograron obtener resultados confiables y los más verídicos posibles en el estudio de seguridad energética realizado.

Figura 10. **Comportamiento del precio spot en Guatemala**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Administrador del Mercado Mayorista (2000). *Norma de coordinación comercial No. 4 precio de oportunidad de la energía.*

### 2.5.2. Costos variables de generación

Felipe (2016) menciona fundamentalmente que “el costo de operación varía para cada tecnología de generación de acuerdo al combustible utilizado y características particulares de operación y mantenimiento” (p. 65); dicho costo variable de generación, dependiendo de la tecnología y el año estacional correspondiente “se puede calcular de acuerdo a una fórmula o metodología que incluya todos los costos en los que se incurre por cada central de generación para poder producir la energía, considerando las características operativas y tipo de combustible” (Felipe, 2016, p. 69).



Bajo las premisas mencionadas, se define al CVG de una central generadora, como el costo económico en la que esta incurre para ingresar a línea e inyectar su generación de electricidad.

Cabe mencionar la importancia de presentar la conceptualización de los CVG's de las centrales, ya que dichos costos son indicadores directos del tipo de tecnología que se esté utilizando en precisos momentos para abastecer de electricidad la demanda de Guatemala, indicadores que se interpretan a través del precio *spot*, lo cual también podría ser un indicador de la cantidad de transacciones de corto plazo que esté realizando el país con México y Centroamérica.

### **2.5.3. Costo operativo**

Para lograr entender e interpretar el significado de costo operativo, se parte del concepto de la función objetivo que fue presentada anteriormente, es por esta razón que se describe lo siguiente:

La función objetivo de la optimización del despacho de generación, desde el punto de vista del operador del sistema, es la función de costo total de la operación, comúnmente llamado costo operativo. Las variables de decisión principales son los costos y tiempos de operación de cada central que se utiliza para abastecer la demanda y reservas diarias operativas. Además, puede considerarse dentro del costo total de la operación los costos por energía no suministrada al déficit de generación para su cobertura. (Felipe, 2016, p. 65)

El costo operativo fue el que optimizó el NCP a través de las simulaciones de despachos de electricidad que se realizaron, para lo cual se pudo interpretar

que un costo operativo relativamente bajo podría significar el costo del abastecimiento de electricidad en días de baja demanda, en época lluviosa, en época de zafra, etc., y un costo operativo relativamente alto podría significar días de alta demanda, época seca, época de no zafra, o para el caso del estudio de seguridad energética realizado, déficit de recursos energéticos en Guatemala.

Tabla IV. **Costos operativos del parque generador de electricidad de Guatemala**

<b>Resumen de costos operativos</b>
De unidades hidroeléctricas
De unidades eólicas
De unidades térmicas
De reserva rodante operativa
Del S.N.I. sin RRa
De reserva rápida
Del S.N.I. con RRa

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Administrador del Mercado Mayorista (2000). *Norma de coordinación comercial No. 4 precio de oportunidad de la energía.*

### **3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

El desarrollo de la investigación se llevó a cabo con base en la metodología planteada para el desarrollo del presente estudio de seguridad energética del parque generador de electricidad de Guatemala.

#### **3.1. Características del estudio**

A continuación, se presentan las características del estudio.

##### **3.1.1. Diseño**

El diseño que se adoptó fue cuasiexperimental, pues en el estudio de seguridad energética que se realizó, se manipularon variables concretas, de las cuales algunas fueron independientes y otras fueron dependientes, es decir, no se poseía el control total sobre las variables que se estudiaron, debido a que las características propias del parque generador de electricidad de Guatemala fueron las variables independientes y las repercusiones que tuvo dicho parque generador ante escenarios de pérdida de generación de las centrales San José y Jaguar Energy fueron las variables dependientes.

##### **3.1.2. Enfoque**

El enfoque del estudio propuesto fue cuantitativo, ya que este se basó en el análisis de la seguridad energética del parque generador de electricidad de Guatemala, para lo que se utilizaron diferentes procedimientos basados en la medición de las repercusiones que tuvo dicho parque generador ante

escenarios de pérdida de generación de las centrales San José y Jaguar Energy; es por esta razón que el estudio propuesto también fue de causalidad, ya que se analizaron las relaciones causales entre los escenarios de déficit energético evaluados y las repercusiones que tuvo el parque generador de electricidad de Guatemala ante dichos escenarios.

### **3.1.3. Alcance**

El alcance del estudio realizado fue exploratorio, dado que este se centró en analizar aspectos concretos de la realidad de la seguridad energética del parque generador de electricidad de Guatemala que no habían sido analizados aún a profundidad, lo cual permitirá que investigaciones posteriores puedan dirigirse a un análisis de la temática que se trató a nivel nacional, las cuales podrían ser más complejas respecto a un contexto particular y permitirían abordar nuevos problemas referentes a seguridad energética en Guatemala.

### **3.1.4. Unidad de análisis**

La unidad de análisis que se estudió fue el parque generador de electricidad de Guatemala, el cual se divide principalmente en tres elementos:

- Centrales generadoras de diferentes tipos de tecnología.
- Importaciones de electricidad provenientes de países vecinos.
- Demanda de electricidad que debe abastecerse.

Cabe mencionar que se extrajeron muestras de forma intencional, las cuales fueron estudiadas en su totalidad. Más adelante en este capítulo se detallarán los criterios utilizados para la selección de los diferentes escenarios.

### 3.2. Variables

Las variables que se estudiaron se describen a continuación:

Tabla V. **Definición teórica y operativa de variables**

<b>Variable</b>	<b>Definición teórica</b>	<b>Definición operativa</b>
Demanda de electricidad [MWh/día]	Electricidad demandada o requerida en Guatemala por consumidores a nivel nacional y a nivel de exportaciones.	Se obtuvo por medio de proyecciones emitidas por el AMM.
Precio <i>spot</i> [US\$/MWh]	Costo marginal de corto plazo de la electricidad en Guatemala en cada hora.	Se obtuvo por medio de proyecciones emitidas por el AMM y cálculos propios con base en la NCC-04.
Costo operativo [US\$/día]	Costo total de la operación del parque generador de electricidad de Guatemala.	Se obtuvo por medio del uso de la función objetivo proporcionada por la herramienta NCP.
Importaciones de electricidad [MWh/día]	Electricidad importada de países vecinos hacia Guatemala.	Se obtuvo por medio de proyecciones emitidas por el AMM.

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Clasificación de las variables**

<b>Variable</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Uso</b>	<b>Nivel de medición</b>
Demanda de electricidad [MWh/día]	Numérica continua	Dependiente	Razón
Precio <i>spot</i> [US\$/MWh]	Numérica continua	Dependiente	Razón
Importaciones de electricidad [MWh/día]	Numérica continua	Dependiente	Razón

Fuente: elaboración propia.

### **3.3. Fases del desarrollo de la investigación**

A continuación, se detallan las fases del desarrollo de la investigación.

#### **3.3.1. Fase 1**

En esta fase se realizó la búsqueda, revisión y consulta de fuentes bibliográficas relacionadas con la temática tratada, como artículos científicos, normas, libros e informes a nivel nacional e internacional, los cuales se utilizaron como fundamento para la realización del primer estudio de seguridad energética del parque generador de electricidad de Guatemala, tanto para la sección de antecedentes como para el capítulo del marco teórico.

#### **3.3.2. Fase 2**

Para determinar las consecuencias que tuvo el precio *spot* de Guatemala ante escenarios de pérdida de generación de las centrales San José y Jaguar Energy, fue necesario primero aprender la metodología de cálculo de dicho precio, lo cual se realizó con base en la Norma de Coordinación Comercial número 4 “PRECIO DE OPORTUNIDAD DE LA ENERGÍA”, norma emitida por el Administrador del Mercado Mayorista.

Las herramientas que se utilizaron durante esta fase del estudio fueron Microsoft Excel para calcular el precio *spot* promedio diario de las simulaciones de despacho de generación realizadas y el NCP para realizar dichas simulaciones, herramienta que utilizó programación lineal para optimizar los diferentes recursos energéticos que se utilizaron como insumos para abastecer la demanda de electricidad a nivel nacional y exportaciones.

Las consecuencias determinadas se obtuvieron realizando comparaciones entre el precio *spot* promedio diario programado de los días analizados, datos que fueron obtenidos de programaciones de despacho diarias emitidas por el Administrador del Mercado Mayorista, y el precio *spot* promedio diario calculado con base en las simulaciones de despacho de generación realizadas, para las cuales se tomaron en consideración los escenarios de pérdida de generación de las centrales San José y Jaguar Energy.

Las comparaciones entre los datos programados y los datos simulados se realizaron haciendo uso de Microsoft Excel, ya que los resultados obtenidos de las repercusiones que tuvo el precio *spot* ante escenarios de déficit energético en el parque generador de electricidad de Guatemala se mostraron numérica y gráficamente (variación total en US\$/MWh y en porcentaje).

### **3.3.3. Fase 3**

Determinar las afectaciones que tuvo el costo operativo del parque generador de electricidad de Guatemala, debido a la indisponibilidad de diferentes bloques de generación, se logró utilizando los despachos de generación simulados en condiciones de déficit energético y calculando el costo operativo de dichos despachos, datos que fueron comparados con el costo operativo de los programas de despacho diario emitidos por el Administrador del Mercado Mayorista de los días analizados en condiciones normales de operación.

Las herramientas que se utilizaron en esta fase del estudio fueron la función objetivo proporcionada por el NCP con la cual se determinó el costo operativo del parque generador de electricidad de Guatemala en condiciones de déficit energético y también en condiciones normales de operación, además de

Microsoft Excel para mostrar los resultados obtenidos numérica y gráficamente (variación total en US\$ y en porcentaje).

#### **3.3.4. Fase 4**

Las importaciones de electricidad provenientes de México fueron modeladas y optimizadas por el NCP; por otro lado, aunque es factible técnica y comercialmente importar electricidad proveniente del Sistema Eléctrico Regional, dicha electricidad no fue considerada en el estudio realizado, ya que su incidencia en el abastecimiento de demanda de electricidad del país hubiera sido prácticamente insignificante para los escenarios seleccionados, lo cual se decidió con base en los datos históricos de importaciones de electricidad de Guatemala.

Los cambios en las transacciones internacionales de electricidad, que se determinaron debido a los diferentes escenarios de déficit energético en el parque generador de electricidad de Guatemala, fueron los resultantes de las importaciones de electricidad provenientes de México y las exportaciones de electricidad que se analizaron en la siguiente fase del estudio, resultados que fueron comparados con transacciones internacionales programadas en condiciones normales de operación (variación total en GWh y porcentaje, además de la valorización de la variación en US\$).

Las herramientas que se utilizaron en esta fase del estudio fue el NCP que optimizó las importaciones y exportaciones de electricidad y Microsoft Excel para presentar los resultados obtenidos numérica y gráficamente. Los datos que se compararon referentes a los escenarios de déficit energético fueron obtenidos de las simulaciones de despacho de generación realizadas y los



datos en condiciones normales de operación se obtuvieron de programaciones de despacho diario emitidas por el Administrador del Mercado Mayorista.

### **3.3.5. Fase 5**

Determinar la cantidad de demanda de electricidad desabastecida debido a la indisponibilidad de centrales térmicas que generan con base en combustibles fósiles, se logró utilizando los despachos de generación simulados en condiciones de déficit energético y considerando las declaraciones de abastecimientos de combustibles de las centrales térmicas del parque generador de electricidad de Guatemala, las cuales estuvieron sujetas al comportamiento del mercado internacional de combustibles fósiles.

Para este caso se tomaron en consideración las declaraciones de existencia de combustibles de todas las centrales térmicas, excluyendo únicamente a las carboneras que estuvieran en línea en los escenarios analizados, ya que dichas centrales cuentan con los *stocks* más grandes comparados con el resto de las centrales térmicas.

El NCP optimizó los recursos energéticos disponibles, los cuales a tal punto no fueron los suficientes para abastecer la demanda de electricidad del parque generador del país; los resultados que se obtuvieron fueron comparados con las condiciones programadas en condiciones normales de operación de los días analizados y así se lograron obtener los datos de electricidad no suministrada y por ende las repercusiones económicas que involucró dicho desabastecimiento (datos en GWh para cada escenario y valorización en US\$).

Para obtener las repercusiones económicas del desabastecimiento de electricidad, se calculó el precio *spot* promedio programado de los días

analizados para cada escenario y con dicho dato se valorizó la demanda de electricidad desabastecida. Se utilizó Microsoft Excel para analizar y presentar los resultados obtenidos de manera numérica y gráfica.

Los datos en condiciones de déficit energético fueron obtenidos de las simulaciones de despachos de generación realizadas y los datos en condiciones normales de operación fueron considerados de programaciones de despacho diario emitidas por el Administrador del Mercado Mayorista. Es importante mencionar que el muestreo utilizado en todas las fases del estudio de seguridad energética realizado fue del tipo intencional para seleccionar los escenarios analizados.

### **3.3.6. Organización de la información**

La organización de la información se realizó de la siguiente manera.

#### **3.3.6.1. Datos generales**

Para cada uno de los escenarios analizados, se tabularon dos tipos de tablas para el análisis de los datos obtenidos. El primer tipo de tabla (ver como ejemplo el apéndice 1) contaba con los siguientes datos ordenados de izquierda a derecha para cada uno de los escenarios analizados:

- Fecha
- POE [US\$/MWh]
- Costo Operativo [US\$]
- Importación México [MWh]
- Exportación México [MWh]
- Exportación SER [MWh]

- Demanda nacional [MWh]
- Energía no suministrada [MWh]
- Potencia indisponible [MW]
- Unidades indisponibles
- Abastecimiento de combustible
- Observaciones

Con la tabla en mención se fueron recopilando los datos obtenidos de cada simulación de despacho de electricidad realizada, correspondientes a los días analizados en cada escenario. El segundo tipo de tabla (ver como ejemplo el apéndice 4) contaba con los siguientes datos ordenados de izquierda a derecha para cada uno de los días de los escenarios analizados:

- Fecha
- Central
- Energía disponible al inicio del día [GWh]
- Energía despachada [GWh]
- Energía disponible al final del día [GWh]
- Fecha de arribo de combustibles
- Días faltantes para el arribo de combustibles
- Energía disponible del arribo [GWh]

Con el segundo tipo de tabla utilizada de manera general, se fueron obteniendo los datos correspondientes para “alimentar” al primer tipo de tabla, ya que se recopilaron datos de unidades indisponibles y por ende potencia indisponible, restricciones de energía que también fueron insumos de las simulaciones de despacho de electricidad y modeladas en el NCP como restricciones de generación, y datos de las centrales que recibían arribos de

combustibles, entre otros datos interesantes que se ven reflejados en ambas tablas.

### **3.3.6.2. Datos específicos**

Los datos específicos se presentan en función de las variables principales analizadas.

#### **3.3.6.2.1. Precio *spot***

Para cada escenario se analizó el precio *spot* de los resultados obtenidos, respecto el precio *spot* programado en condiciones normales de operación. Para realizar el análisis correspondiente se utilizaron tablas (ver como ejemplo la tabla VIII de la sección de Resultados) que contenían la siguiente información ordenada de izquierda a derecha para cada escenario:

- Fecha
- POE del escenario correspondiente [US\$/MWh]
- POE programado [US\$/MWh]
- Variación [US\$]
- Variación [%]

Adicionalmente, se graficaron tres variables para el respectivo análisis, las cuales fueron (ver como ejemplo la figura 12 de la sección de Resultados):

- POE del escenario correspondiente [US\$/MWh]
- POE programado [US\$/MWh]
- Potencia indisponible [MW]

### **3.3.6.2.2. Costo operativo**

Para cada escenario se analizó el costo operativo de los resultados obtenidos, respecto el costo operativo programado en condiciones normales de operación. Para realizar el análisis correspondiente se utilizaron tablas (ver como ejemplo la tabla XI de la sección de Resultados) que contenían la siguiente información ordenada de izquierda a derecha para cada escenario:

- Fecha
- Costo operativo del escenario correspondiente [US\$/MWh]
- Costo operativo programado [US\$/MWh]
- Variación [US\$]
- Variación [%]

Adicionalmente, se graficaron tres variables para el respectivo análisis, las cuales fueron (ver como ejemplo la figura 15 de la sección de Resultados):

- Costo operativo del escenario correspondiente [US\$/MWh]
- Costo operativo programado [US\$/MWh]
- Potencia indisponible [MW]

### **3.3.6.2.3. Transacciones internacionales**

Para el análisis de las transacciones internacionales de los escenarios estudiados se tabularon tres tipos de tablas, en las cuales se analizaron las transacciones con México y Centroamérica. Para el primer tipo de tabla (ver como ejemplo la tabla XIV de la sección de Resultados) se tabularon los siguientes datos de izquierda a derecha:

- Importación México del escenario correspondiente [GWh]
- Importación México Programada [GWh]
- Variación [GWh]
- Variación [%]
- Valorización de la variación [US\$]

La tabla anterior corresponde al análisis de las importaciones de electricidad con México. Para el segundo tipo de tabla (ver como ejemplo la tabla XV de la sección de Resultados) se tabularon los siguientes datos de izquierda a derecha:

- Exportación México del escenario correspondiente [GWh]
- Exportación México Programada [GWh]
- Variación [GWh]
- Variación [%]
- Valorización de la variación [US\$]

La tabla anterior corresponde al análisis de las exportaciones de electricidad con México. Para el tercer tipo de tabla (ver como ejemplo la tabla XVI) se tabularon los siguientes datos de izquierda a derecha:

- Exportación SER del escenario correspondiente [GWh]
- Exportación SER Programada [GWh]
- Variación [GWh]
- Variación [%]
- Valorización de la variación [US\$]

La tabla anterior corresponde al análisis de las exportaciones de electricidad con el SER o Centroamérica.

#### **3.3.6.2.4. Demanda desabastecida**

La demanda de electricidad desabastecida fue tabulada por cada escenario (ver tabla XXIII de la sección de resultados) tomando en consideración el total de los datos obtenidos. También se consideró la valorización de la demanda desabastecida, por lo que la tabla correspondiente para el análisis cuenta con la siguiente estructura de izquierda a derecha:

- Escenarios
- Demanda desabastecida [GWh]
- Valorización [US\$]

Adicionalmente, también se graficaron las tres variables anteriores para analizar su comportamiento (ver figura 18 en la sección resultados).

#### **3.4. Determinación de escenarios**

Como se mencionó anteriormente en el presente capítulo, la selección de escenarios utilizados se realizó por medio de muestreo intencional, ya que el investigador pretendía evidenciar por medio del estudio realizado la necesidad de contar, mejorar o aumentar la seguridad energética del parque generador de electricidad de Guatemala. Los criterios para la selección de los escenarios se centraron en el nivel crítico que estos podrían llegar a representar ante la pérdida de generación de las centrales San José y Jaguar Energy, ya que dichas centrales son generación base para la matriz energética del país, sobre todo en las condiciones tomadas en cuenta para el establecimiento de los escenarios simulados.

Como bien se sabe, la temática principal se centró en los escenarios de pérdida de generación de las centrales San José y Jaguar Energy, los cuales se determinaron de una manera muy simple debido a que las tres unidades involucradas, una unidad de San José y dos unidades de Jaguar Energy, poseen una capacidad efectiva instalada muy similar para la fecha en las que se realizaron las simulaciones de despacho de generación de electricidad:

- San José (SJO-C): 135.8 MW aproximadamente.
- Jaguar Energy Unidad 1 (JEN-C1): 134.5 MW aproximadamente.
- Jaguar Energy Unidad 2 (JEN-C2): 136.8 MW aproximadamente.

En cuanto a modelación en el NCP, cada uno de los escenarios analizados dejó de considerar a la (s) unidad (es) correspondiente (s), ya que dicha herramienta presenta la opción de no considerar por completo o parcialmente a la (s) unidad (es) para cada día.

En el siguiente capítulo, donde se presentaron los resultados del presente estudio, se detallaron los tres escenarios considerados según lo planteado anteriormente.

#### **3.4.1. Finalización de época de zafra y época lluviosa en Guatemala**

Se tomó en consideración el histórico de las fechas de finalización de la época de zafra (ningún ingenio cogenerador en línea para inyectar su generación al parque generador de electricidad) de los últimos tres años estacionales, esto para seleccionar las fechas de las bases de datos del NCP que se utilizaron, las declaraciones de *stock* de combustibles de las centrales térmicas, entre otras consideraciones que se detallarán más adelante:



- Fecha de fin de zafra 2017-2018: 01/06/2018.
- Fecha de fin de zafra 2018-2019: 15/06/2019.
- Fecha de fin de zafra 2019-2020: 21/05/2020.

Tomando como ejemplo las fechas anteriores, la época de zafra en Guatemala finaliza por lo regular a finales del mes de mayo de cada año calendario, por lo que se tomó la decisión de que la fecha de referencia para las diferentes consideraciones críticas tomadas en cuenta para los escenarios simulados fueran las siguientes, todo esto a criterio del investigador:

- Declaraciones de *stock* de combustibles: 28/05/2019.
- Bases de datos del NCP para días entre semana: 28/05/2019.
- Bases de datos del NCP para fines de semana: 25/05/2019.

Para cada simulación de despacho de electricidad de lunes a viernes, la fecha que se simuló en el NCP fue la del 28/05/2019 y para cada simulación de despacho de electricidad de sábado y domingo la fecha que se simuló fue la el 25/05/2019. Las declaraciones de *stock* de combustibles de la fecha 28/05/2019, para ser consideradas en el NCP, se “tradujeron” en la energía disponible al inicio de cada día analizado de las centrales térmicas involucradas; esto fue modelado en el NCP como restricciones de generación que fueron determinando la disponibilidad de generación de electricidad sujeta a la disponibilidad de combustible de cada central.

Por otro lado, es importante mencionar que la finalización de la época de zafra en Guatemala coincide por lo general con el inicio de la época lluviosa del país, lo cual fue una de las consideraciones importantes que también fue tomada en cuenta para la selección de las fechas correspondientes que se listaron anteriormente, ya que el 2019 fue un año hidrológicamente malo.

### **3.4.2. Otras consideraciones**

Otras consideraciones un tanto más general que se tomaron en cuenta fueron las siguientes:

- No se consideraron aperturas unilaterales realizados por Ente Operador Regional (EOR). Dichas aperturas no se consideraron debido a que actualmente los parámetros técnicos establecidos entre Guatemala y México coinciden con los establecidos por el EOR para la evaluación respectiva de desconectar a Guatemala del Sistema Eléctrico Regional, lo cual hubiera afectado también al abastecimiento de la exportación que realiza Guatemala al resto de Centroamérica.
- Los combustibles utilizados de las declaraciones de *stock* de combustible fueron el bunker de arranque rápido y diésel. Se tomó tal consideración ya que las centrales que utilizan este tipo de combustibles son las que se encuentran disponibles para despacho al momento de ocurrir una contingencia como las evaluadas en los escenarios considerados en el estudio de seguridad energética, y también tomando en cuenta que las centrales de carbón y de bunker de arranque lento dependen de la definición de la política operativa semanal correspondiente, además que hasta la fecha la única central que utiliza gas natural como recurso primario es muy pequeña y poco significativa para el parque generador de electricidad de Guatemala (3 MW aproximadamente).

### **3.5. Obtención de insumos**

Los insumos utilizados se obtuvieron como se indica a continuación.

### **3.5.1. Bases de datos del NCP**

Las bases de datos del NCP utilizadas fueron proporcionadas por el Administrador del Mercado Mayorista, ya que dicha entidad apoyó en facilitar en todo momento al investigador la información necesaria para la realización del estudio de seguridad energética. Las bases de datos del NCP son un conjunto de archivos en formato .csv conjugados en una carpeta, cuya ubicación es el directorio que hay que ubicar al momento de abrir dicha herramienta. Las bases de datos contienen información de condiciones hidrológicas, precios de generación, indisponibilidades de diferentes centrales y sus respectivas características por tecnología, entre otros datos fundamentales para el uso del NCP.

### **3.5.2. Declaración de stock de combustibles**

Se utilizaron las declaraciones de las centrales térmicas con la previa autorización del Administrador del Mercado Mayorista, quién exige y administra, según normativa vigente, este tipo de declaraciones para los procesos concernientes a las diferentes programaciones que realiza y la operación en tiempo real del parque generador de electricidad de Guatemala.

### **3.5.3. Programaciones del Administrador del Mercado Mayorista**

Las programaciones utilizadas como base para la comparación de los diferentes resultados obtenidos se pudieron recolectar por medio de la página web del Administrador del Mercado Mayorista ([www.amm.org.gt](http://www.amm.org.gt)), ya que dicha información es pública para todas las personas en general.

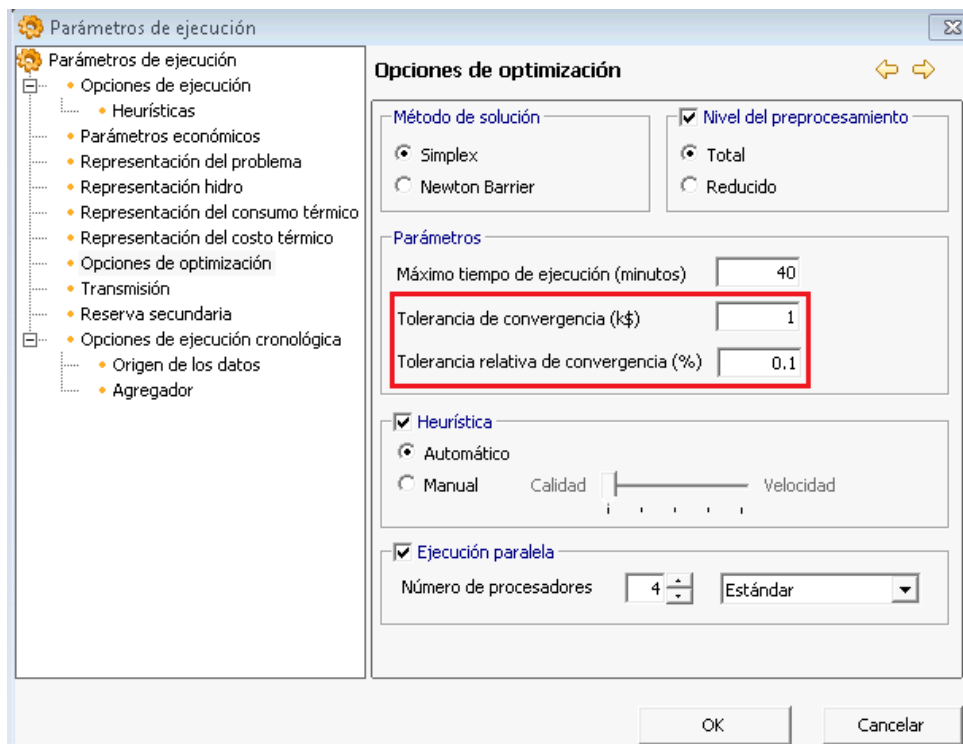
### 3.6. Técnicas de análisis de información

Las técnicas de análisis de información que se utilizaron fueron las siguientes.

#### 3.6.1. Tolerancia de los resultados obtenidos

La herramienta NCP presentó la opción de definir las diferentes tolerancias de convergencia de los resultados obtenidos, lo cual se definió para cada una de las simulaciones de despacho realizadas, tal y como se muestra a continuación:

Figura 11. Tolerancias de convergencia



Fuente: elaboración propia.

Como se pudo observar en la imagen anterior, la tolerancia de convergencia utilizada fue de 1 kUS\$ y la tolerancia relativa de convergencia fue de 0.1 %, valores que fueron recomendados y definidos previamente por el investigador con base en su experiencia en el uso de la herramienta NCP. Cabe mencionar que la tolerancia de convergencia corresponde a cuando la diferencia entre la mejor solución encontrada y un límite superior es menor que la tolerancia definida y la tolerancia relativa de convergencia es una forma alternativa de definir la tolerancia de convergencia.

### **3.6.2. Métodos de análisis de datos**

Debido a la estacionalidad de los datos recolectados, los cuales fueron obtenidos principalmente de las simulaciones de despacho de generación de electricidad realizadas para cada escenario, se determinó que los datos totalizados de precio *spot* y costo operativo para los resultados de los objetivos específicos uno y dos, se representarían a través de las sumas totales de ambas variables al final de cada horizonte de tiempo analizado, lo cual también involucró la variación en su respectiva dimensional y de manera porcentual.

Se tomó tal decisión debido a que calcular el promedio de los datos analizados para cada variable, realmente no sería representativo de la información que se deseaba presentar, ya que las variaciones de los datos obtenidos entre cada día hubieran podido llegar a ser muy grandes, debido a la estacionalidad mencionada, lo cual también hubiera repercutido en que el cálculo de la desviación estándar arrojará un valor que no hubiera sido representativa de lo que realmente se analizó.

Para el caso de los resultados correspondientes a los objetivos específicos tres y cuatro, por la naturaleza de las variables (importaciones, exportaciones y

demanda de electricidad), también se consideró la totalización de estas para cada escenario, en donde también se calculó la variación en su respectiva dimensional y de manera porcentual.

### 3.6.2.1. Totalización de resultados

Se presenta la ecuación que se utilizó para la totalización de los resultados.

$$Total = \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

- *Total*: totalización de los resultados obtenidos para cada variable de los objetivos específicos en cada escenario analizado.
- $x_i$ : i-ésima variable en estudio.
- $n$ : número de días del horizonte analizado.

### 3.6.2.2. Variación total

Se presenta la ecuación que se utilizó para el cálculo de la variación total de los resultados obtenidos.

$$Variación = Total_2 - Total_1 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

- *Variación*: variación total de los resultados obtenidos en condiciones normales de operación respecto al total de los resultados obtenidos en condiciones de déficit energético.
- *Total<sub>2</sub>*: totalización de los resultados obtenidos en condiciones de déficit energético.
- *Total<sub>1</sub>*: totalización de los resultados obtenidos en condiciones normales de operación.

### 3.6.2.3. Variación porcentual

Se presenta la ecuación que se utilizó para el cálculo de la variación porcentual de los resultados obtenidos:

$$\text{Variación \%} = \frac{\text{Total}_2 - \text{Total}_1}{\text{Total}_1} \times 100 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

- *Variación %*: variación porcentual del total de los resultados obtenidos en condiciones normales de operación respecto al total de los resultados obtenidos en condiciones de déficit energético.
- *Total<sub>2</sub>*: totalización de los resultados obtenidos en condiciones de déficit energético.
- *Total<sub>1</sub>*: totalización de los resultados obtenidos en condiciones normales de operación.





## 4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados que se obtuvieron del estudio de seguridad energética del parque generador de electricidad de Guatemala realizado.

### 4.1. Escenarios analizados

Según la metodología planteada en el capítulo anterior, se definieron los tres escenarios de pérdida de generación que se analizaron, esto debido a que las tres unidades, una unidad de San José y dos unidades de Jaguar Energy, para la fecha de referencia en la que se realizó el presente estudio, presentan prácticamente la misma capacidad efectiva instalada, por lo que los escenarios analizados fueron los siguientes:

Tabla VII. **Escenarios de pérdida de generación**

<b>Escenarios</b>	<b>Descripción</b>
Primer escenario	SJO-C fuera de servicio
Segundo escenario	SJO-C y JEN-C1 fuera de servicio
Tercer escenario	SJO-C, JEN-C1 y JEN-C2 fuera de servicio

Fuente: elaboración propia.

### 4.2. Consecuencias en el precio *spot* ante escenarios de pérdida de generación de las centrales San José y Jaguar Energy

Los resultados para los tres escenarios fueron los siguientes (tolerancia de convergencia de 1 kUS\$ y tolerancia relativa de convergencia de 0.1 %):

Tabla VIII. Consecuencias en el precio *spot* para el primer escenario (SJO-C fuera de servicio)

Fecha	POE escenario [US\$/MWh]	1er. POE programado [US\$/MWh]	Variación [US\$]	Variación [%]
27/05/2019	\$115.81	\$72.38	\$43.43	60.01 %
28/05/2019	\$118.11	\$99.70	\$18.40	18.46 %
29/05/2019	\$126.44	\$98.68	\$27.76	28.13 %
30/05/2019	\$122.10	\$94.23	\$27.88	29.59 %
31/05/2019	\$124.73	\$68.31	\$56.43	82.61 %
01/06/2019	\$103.50	\$62.76	\$40.74	64.91 %
02/06/2019	\$103.69	\$50.48	\$53.21	105.40 %
03/06/2019	\$132.22	\$76.95	\$55.28	71.84 %
04/06/2019	\$130.85	\$74.11	\$56.75	76.58 %
05/06/2019	\$130.85	\$71.65	\$59.20	82.63 %
06/06/2019	\$130.85	\$77.53	\$53.32	68.78 %
07/06/2019	\$130.85	\$70.83	\$60.02	84.75 %
08/06/2019	\$103.69	\$71.07	\$32.63	45.91 %
09/06/2019	\$103.69	\$63.81	\$39.89	62.51 %
10/06/2019	\$130.85	\$71.91	\$58.95	81.98 %
11/06/2019	\$130.85	\$77.14	\$53.71	69.62 %
12/06/2019	\$130.85	\$74.28	\$56.57	76.15 %
13/06/2019	\$130.85	\$74.26	\$56.59	76.21 %
14/06/2019	\$138.30	\$73.71	\$64.59	87.62 %
15/06/2019	\$123.02	\$64.39	\$58.63	91.06 %
16/06/2019	\$125.06	\$46.45	\$78.62	169.26 %
17/06/2019	\$252.61	\$65.17	\$187.45	287.65 %
18/06/2019	\$245.15	\$72.24	\$172.91	239.35 %
19/06/2019	\$138.01	\$75.72	\$62.29	82.27 %
20/06/2019	\$139.00	\$88.03	\$50.97	57.89 %
21/06/2019	\$139.00	\$76.37	\$62.63	82.00 %
22/06/2019	\$121.58	\$83.33	\$38.25	45.90 %
23/06/2019	\$121.58	\$72.78	\$48.80	67.05 %
24/06/2019	\$139.00	\$68.35	\$70.65	103.38 %
25/06/2019	\$136.31	\$74.04	\$62.27	84.10 %
<b>Total</b>	<b>\$4,019.44</b>	<b>\$2,210.64</b>	<b>\$1,808.80</b>	<b>81.82 %</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Consecuencias en el precio spot para el segundo escenario (SJO-C y JEN-C1 fuera de servicio)**

Fecha	POE escenario [US\$/MWh]	2do. POE programado [US\$/MWh]	Variación [US\$]	Variación [%]
27/05/2019	\$124.19	\$72.38	\$51.81	71.58 %
28/05/2019	\$170.60	\$99.70	\$70.89	71.10 %
29/05/2019	\$207.90	\$98.68	\$109.22	110.68 %
30/05/2019	\$136.80	\$94.23	\$42.57	45.18 %
31/05/2019	\$195.82	\$68.31	\$127.52	186.69 %
01/06/2019	\$135.21	\$62.76	\$72.45	115.43 %
02/06/2019	\$135.21	\$50.48	\$84.73	167.83 %
03/06/2019	\$137.24	\$76.95	\$60.29	78.36 %
04/06/2019	\$137.24	\$74.11	\$63.13	85.19 %
05/06/2019	\$137.24	\$71.65	\$65.59	91.54 %
06/06/2019	\$137.24	\$77.53	\$59.71	77.01 %
07/06/2019	\$137.24	\$70.83	\$66.41	93.76 %
08/06/2019	\$135.21	\$71.07	\$64.15	90.26 %
09/06/2019	\$135.21	\$63.81	\$71.41	111.91 %
10/06/2019	\$137.24	\$71.91	\$65.33	90.86 %
11/06/2019	\$137.24	\$77.14	\$60.09	77.90 %
12/06/2019	\$136.28	\$74.28	\$62.00	83.46 %
13/06/2019	\$142.57	\$74.26	\$68.31	91.99 %
14/06/2019	\$142.57	\$73.71	\$68.86	93.42 %
15/06/2019	\$140.25	\$64.39	\$75.87	117.83 %
16/06/2019	\$140.25	\$46.45	\$93.81	201.96 %
17/06/2019	\$142.57	\$65.17	\$77.41	118.79 %
18/06/2019	\$137.93	\$72.24	\$65.69	90.93 %
<b>Total</b>	<b>\$3,319.26</b>	<b>\$1,672.02</b>	<b>\$1,647.25</b>	<b>98.52 %</b>

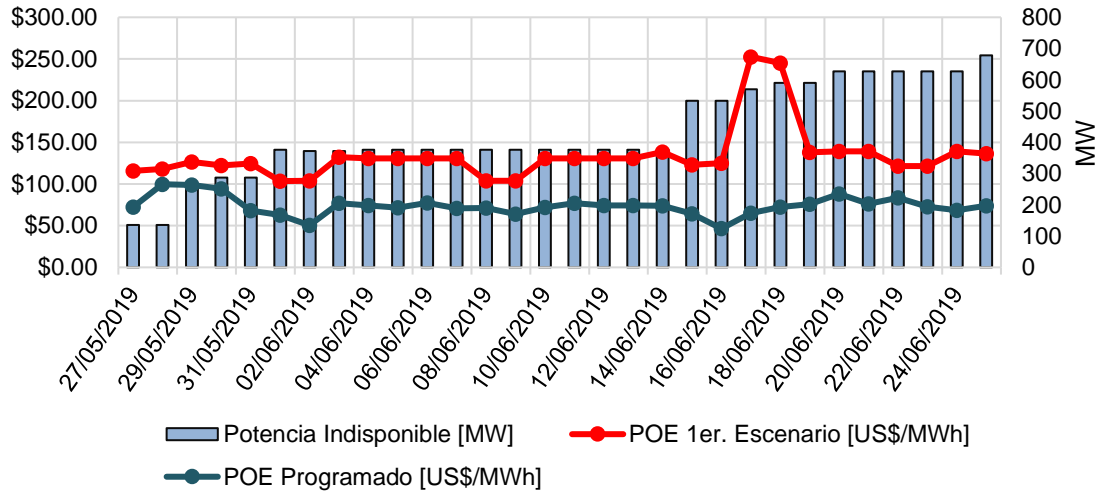
Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Consecuencias en el precio spot para el tercer escenario (SJO-C, JEN-C1 y JEN-C2 fuera de servicio)**

Fecha	POE escenario [US\$/MWh]	3er. POE programado [US\$/MWh]	Variación [US\$]	Variación [%]
27/05/2019	\$138.10	\$72.38	\$65.73	90.81 %
28/05/2019	\$272.02	\$99.70	\$172.32	172.83 %
29/05/2019	\$282.95	\$98.68	\$184.27	186.73 %
30/05/2019	\$139.61	\$94.23	\$45.38	48.16 %
31/05/2019	\$138.62	\$68.31	\$70.32	102.95 %
01/06/2019	\$141.57	\$62.76	\$78.80	125.56 %
02/06/2019	\$141.57	\$50.48	\$91.08	180.42 %
03/06/2019	\$139.55	\$76.95	\$62.60	81.36 %
04/06/2019	\$139.55	\$74.11	\$65.45	88.31 %
05/06/2019	\$139.55	\$71.65	\$67.90	94.77 %
06/06/2019	\$139.55	\$77.53	\$62.02	80.00 %
07/06/2019	\$139.55	\$70.83	\$68.72	97.03 %
08/06/2019	\$141.57	\$71.07	\$70.50	99.20 %
09/06/2019	\$141.57	\$63.81	\$77.76	121.87 %
10/06/2019	\$139.55	\$71.91	\$67.64	94.07 %
11/06/2019	\$139.55	\$77.14	\$62.41	80.90 %
12/06/2019	\$142.57	\$74.28	\$68.29	91.93 %
13/06/2019	\$142.57	\$74.26	\$68.31	91.99 %
14/06/2019	\$142.57	\$73.71	\$68.86	93.42 %
15/06/2019	\$142.57	\$64.39	\$78.19	121.44 %
16/06/2019	\$142.57	\$46.45	\$96.13	206.96 %
17/06/2019	\$142.57	\$65.17	\$77.41	118.79 %
18/06/2019	\$142.57	\$72.24	\$70.33	97.36 %
<b>Total</b>	<b>\$3,512.45</b>	<b>\$1,672.02</b>	<b>\$1,840.43</b>	<b>110.07 %</b>

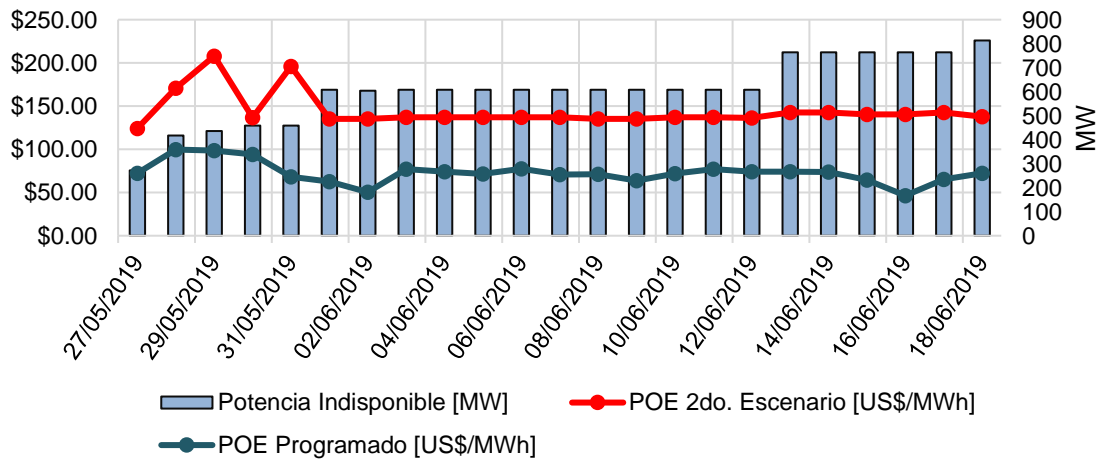
Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Comportamiento del precio *spot* para el primer escenario (SJO-C fuera de servicio)



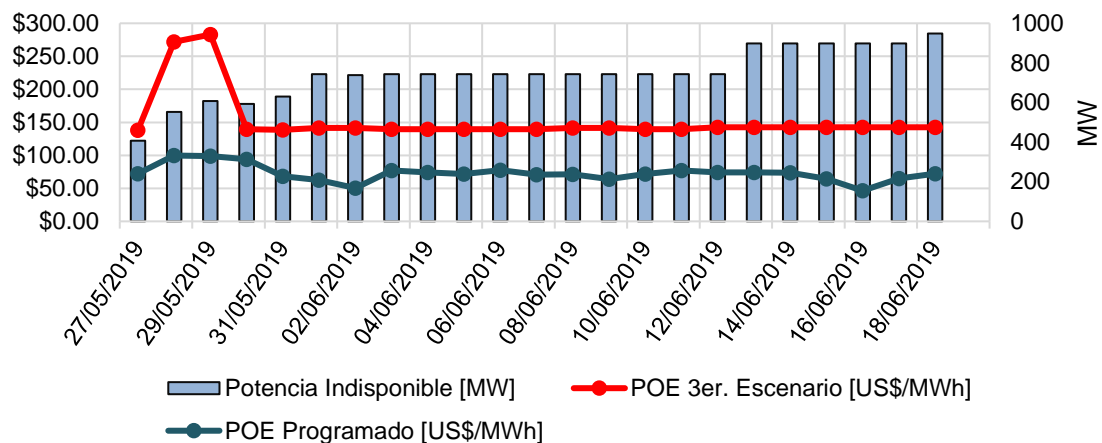
Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Comportamiento del precio *spot* para el segundo escenario (SJO-C y JEN-C1 fuera de servicio)



Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Comportamiento del precio spot para el tercer escenario (SJO-C, JEN-C1 y JEN-C2 fuera de servicio)**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.3. **Afectaciones en el costo operativo del parque generador de electricidad debido a la indisponibilidad de diferentes bloques de generación**

Los resultados para los tres escenarios fueron los siguientes (tolerancia de convergencia de 1 kUS\$ y tolerancia relativa de convergencia de 0.1 %):

Tabla XI. **Afectaciones en el costo operativo para el primer escenario (SJO-C fuera de servicio)**

Fecha	Costo operativo 1er. escenario [US\$]	Costo operativo programado [US\$]	Variación [US\$]	Variación [%]
27/05/2019	\$2,503,843.60	\$1,646,296.26	\$857,547.35	52.09 %
28/05/2019	\$2,506,973.39	\$2,118,864.88	\$388,108.51	18.32 %
29/05/2019	\$2,532,095.02	\$2,272,667.36	\$259,427.66	11.42 %

Continuación tabla XI.

Fecha	Costo operativo 1er. escenario [US\$]	Costo operativo programado [US\$]	Variación [US\$]	Variación [%]
30/05/2019	\$2,518,560.04	\$2,201,108.32	\$317,451.73	14.42 %
31/05/2019	\$2,534,496.41	\$1,901,083.19	\$633,413.22	33.32 %
01/06/2019	\$1,895,060.30	\$1,743,918.75	\$151,141.55	8.67 %
02/06/2019	\$1,895,035.51	\$1,289,126.43	\$605,909.08	47.00 %
03/06/2019	\$2,556,222.09	\$1,839,270.47	\$716,951.62	38.98 %
04/06/2019	\$2,558,044.78	\$2,374,534.70	\$183,510.07	7.73 %
05/06/2019	\$2,558,044.78	\$2,321,835.04	\$236,209.73	10.17 %
06/06/2019	\$2,558,044.78	\$1,926,455.18	\$631,589.60	32.79 %
07/06/2019	\$2,558,044.78	\$2,113,046.20	\$444,998.57	21.06 %
08/06/2019	\$1,895,035.51	\$1,772,876.70	\$122,158.80	6.89 %
09/06/2019	\$1,895,035.51	\$1,368,927.19	\$526,108.32	38.43 %
10/06/2019	\$2,558,044.78	\$1,733,953.26	\$824,091.52	47.53 %
11/06/2019	\$2,558,044.78	\$1,803,312.91	\$754,731.87	41.85 %
12/06/2019	\$2,558,044.78	\$1,891,352.42	\$666,692.36	35.25 %
13/06/2019	\$2,558,044.78	\$1,784,663.18	\$773,381.60	43.33 %
14/06/2019	\$2,631,810.04	\$2,263,542.91	\$368,267.13	16.27 %
15/06/2019	\$2,099,298.11	\$1,416,077.73	\$683,220.38	48.25 %
16/06/2019	\$2,086,843.39	\$1,286,519.48	\$800,323.91	62.21 %
17/06/2019	\$2,708,947.99	\$1,759,320.17	\$949,627.82	53.98 %
18/06/2019	\$2,691,588.96	\$2,149,122.60	\$542,466.35	25.24 %
19/06/2019	\$2,278,728.92	\$2,291,980.12	-\$13,251.20	-0.58 %
20/06/2019	\$2,456,652.24	\$2,171,067.80	\$285,584.44	13.15 %
21/06/2019	\$2,456,652.24	\$1,744,032.66	\$712,619.58	40.86 %
22/06/2019	\$2,120,965.61	\$1,737,019.33	\$383,946.28	22.10 %
23/06/2019	\$2,120,965.61	\$1,455,077.15	\$665,888.46	45.76 %
24/06/2019	\$2,396,868.65	\$1,575,872.02	\$820,996.63	52.10 %
25/06/2019	\$2,247,128.35	\$1,865,376.78	\$381,751.57	20.47 %
<b>Total</b>	<b>\$71,493,165.71</b>	<b>\$55,818,301.18</b>	<b>\$15,674,864.53</b>	<b>28.08 %</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Afectaciones en el costo operativo para el segundo escenario (SJO-C y JEN-C1 fuera de servicio)**

<b>Fecha</b>	<b>Costo operativo 2do. escenario [US\$]</b>	<b>Costo operativo programado [US\$]</b>	<b>Variación [US\$]</b>	<b>Variación [%]</b>
27/05/2019	\$2,747,543.81	\$1,646,296.26	\$1,101,247.56	66.89 %
28/05/2019	\$2,941,068.06	\$2,118,864.88	\$822,203.18	38.80 %
29/05/2019	\$2,952,371.97	\$2,272,667.36	\$679,704.61	29.91 %
30/05/2019	\$2,822,311.21	\$2,201,108.32	\$621,202.89	28.22 %
31/05/2019	\$2,883,311.55	\$1,901,083.19	\$982,228.36	51.67 %
01/06/2019	\$2,171,086.77	\$1,743,918.75	\$427,168.02	24.49 %
02/06/2019	\$2,169,359.09	\$1,289,126.43	\$880,232.66	68.28 %
03/06/2019	\$2,480,776.37	\$1,839,270.47	\$641,505.90	34.88 %
04/06/2019	\$2,480,776.37	\$2,374,534.70	\$106,241.67	4.47 %
05/06/2019	\$2,480,776.37	\$2,321,835.04	\$158,941.33	6.85 %
06/06/2019	\$2,480,776.37	\$1,926,455.18	\$554,321.19	28.77 %
07/06/2019	\$2,480,776.37	\$2,113,046.20	\$367,730.17	17.40 %
08/06/2019	\$2,171,086.77	\$1,772,876.70	\$398,210.07	22.46 %
09/06/2019	\$2,171,086.77	\$1,368,927.19	\$802,159.58	58.60 %
10/06/2019	\$2,480,776.37	\$1,733,953.26	\$746,823.11	43.07 %
11/06/2019	\$2,480,776.37	\$1,803,312.91	\$677,463.46	37.57 %
12/06/2019	\$2,399,969.53	\$1,891,352.42	\$508,617.12	26.89 %
13/06/2019	\$2,288,356.23	\$1,784,663.18	\$503,693.05	28.22 %
14/06/2019	\$2,288,356.23	\$2,263,542.91	\$24,813.32	1.10 %
15/06/2019	\$2,005,968.85	\$1,416,077.73	\$589,891.12	41.66 %
16/06/2019	\$2,005,968.85	\$1,286,519.48	\$719,449.37	55.92 %
17/06/2019	\$2,613,681.48	\$1,759,320.17	\$854,361.31	48.56 %
18/06/2019	\$2,587,098.34	\$2,149,122.60	\$437,975.74	20.38 %
<b>Total</b>	<b>\$56,584,060.11</b>	<b>\$42,977,875.33</b>	<b>\$13,606,184.79</b>	<b>31.66 %</b>

Fuente: elaboración propia.

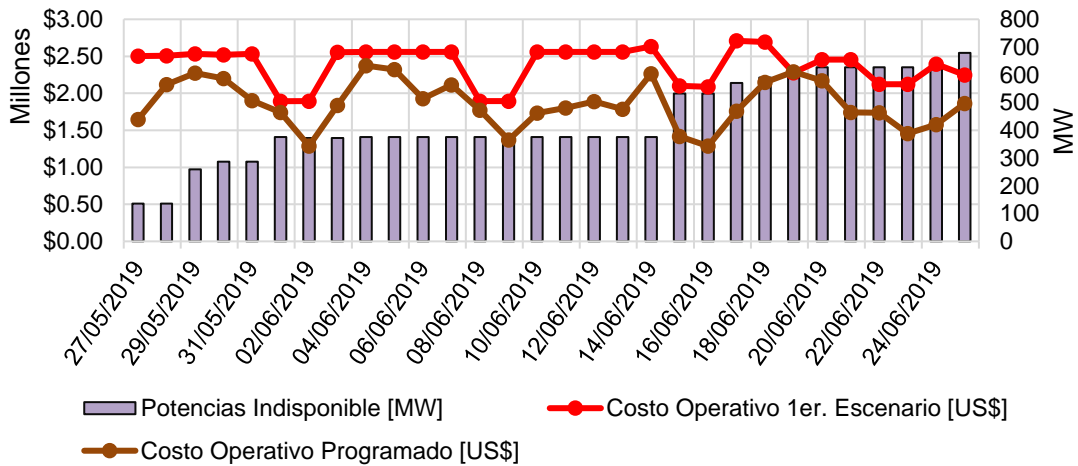


Tabla XIII. **Afectaciones en el costo operativo para el tercer escenario (SJO-C, JEN-C1 y JEN-C2 fuera de servicio)**

<b>Fecha</b>	<b>Costo operativo 3er. escenario [US\$]</b>	<b>Costo operativo programado [US\$]</b>	<b>Variación [US\$]</b>	<b>Variación [%]</b>
27/05/2019	\$3,043,273.63	\$1,646,296.26	\$1,396,977.38	84.86 %
28/05/2019	\$2,881,583.60	\$2,118,864.88	\$762,718.71	36.00 %
29/05/2019	\$2,717,826.96	\$2,272,667.36	\$445,159.59	19.59 %
30/05/2019	\$2,696,370.21	\$2,201,108.32	\$495,261.89	22.50 %
31/05/2019	\$2,497,588.23	\$1,901,083.19	\$596,505.04	31.38 %
01/06/2019	\$2,508,419.24	\$1,743,918.75	\$764,500.49	43.84 %
02/06/2019	\$2,511,910.32	\$1,289,126.43	\$1,222,783.89	94.85 %
03/06/2019	\$2,827,582.69	\$1,839,270.47	\$988,312.22	53.73 %
04/06/2019	\$2,827,582.69	\$2,374,534.70	\$453,047.99	19.08 %
05/06/2019	\$2,827,582.69	\$2,321,835.04	\$505,747.65	21.78 %
06/06/2019	\$2,827,582.69	\$1,926,455.18	\$901,127.52	46.78 %
07/06/2019	\$2,827,582.69	\$2,113,046.20	\$714,536.49	33.82 %
08/06/2019	\$2,508,419.24	\$1,772,876.70	\$735,542.54	41.49 %
09/06/2019	\$2,508,419.24	\$1,368,927.19	\$1,139,492.05	83.24 %
10/06/2019	\$2,827,582.69	\$1,733,953.26	\$1,093,629.43	63.07 %
11/06/2019	\$2,827,582.69	\$1,803,312.91	\$1,024,269.78	56.80 %
12/06/2019	\$2,769,981.35	\$1,891,352.42	\$878,628.94	46.46 %
13/06/2019	\$3,134,068.51	\$1,784,663.18	\$1,349,405.33	75.61 %
14/06/2019	\$3,134,068.51	\$2,263,542.91	\$870,525.60	38.46 %
15/06/2019	\$2,651,186.36	\$1,416,077.73	\$1,235,108.63	87.22 %
16/06/2019	\$2,651,186.36	\$1,286,519.48	\$1,364,666.88	106.07 %
17/06/2019	\$3,250,190.02	\$1,759,320.17	\$1,490,869.86	84.74 %
18/06/2019	\$4,296,923.39	\$2,149,122.60	\$2,147,800.78	99.94 %
<b>Total</b>	<b>\$65,554,494.02</b>	<b>\$42,977,875.33</b>	<b>\$22,576,618.70</b>	<b>52.53 %</b>

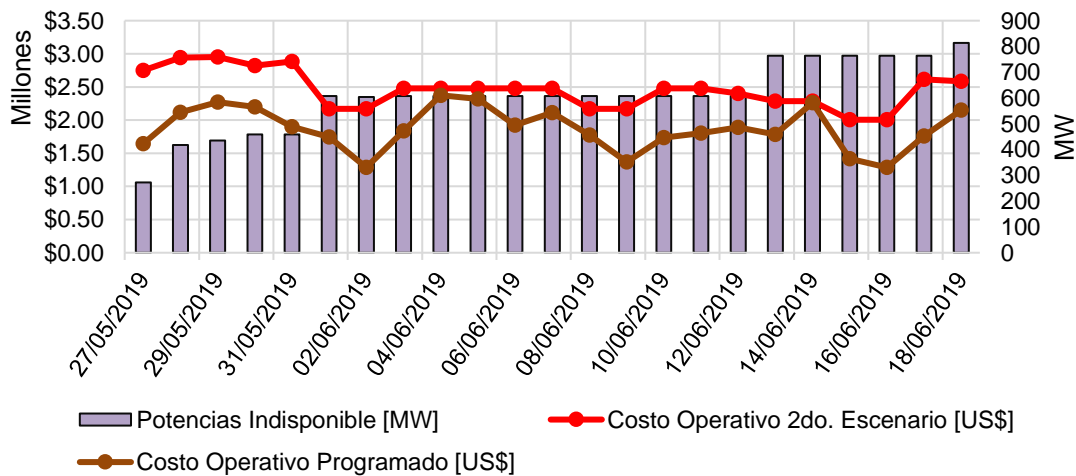
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Comportamiento del costo operativo para el primer escenario (SJO-C fuera de servicio)



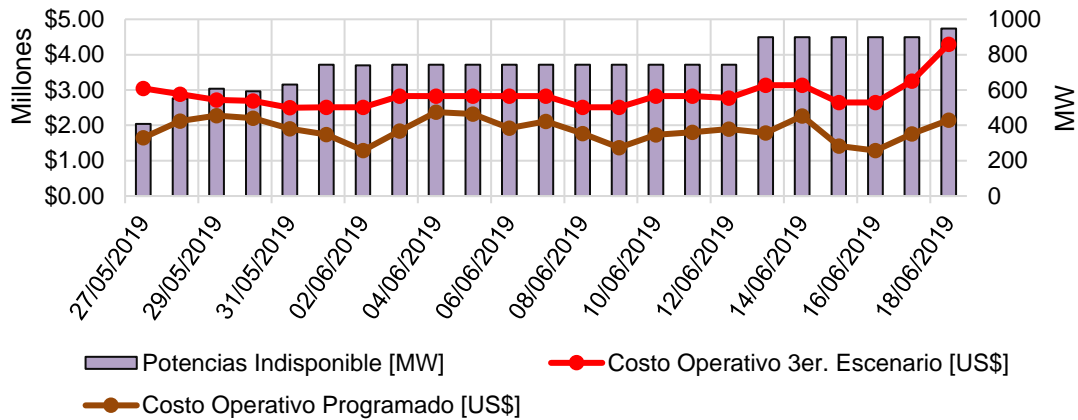
Fuente: elaboración propia.

Figura 16. Comportamiento del costo operativo para el segundo escenario (SJO-C y JEN-C1 fuera de servicio)



Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Comportamiento del costo operativo para el tercer escenario (SJO-C, JEN-C1 y JEN-C2 fuera de servicio)**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.4. Cambios en las transacciones internacionales debido a los escenarios de déficit energético en el parque generador de electricidad

Los resultados para los tres escenarios fueron los siguientes (tolerancia de convergencia de 1 kUS\$ y tolerancia relativa de convergencia de 0.1 %):

Tabla XIV. **Cambios en las importaciones de electricidad con México para el primer escenario (SJO-C fuera de servicio)**

Importación México 1er. escenario [GWh]	Importación México programada [GWh]	Variación [GWh]	Variación [%]	Valorización de la variación [US\$]
139	86	53	61 %	\$3,908,332

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Cambios en las exportaciones de electricidad con México para el primer escenario (SJO-C fuera de servicio)**

<b>Exportación México 1er. escenario [GWh]</b>	<b>Exportación México programada [GWh]</b>	<b>Variación [GWh]</b>	<b>Variación [%]</b>	<b>Valorización de la variación [US\$]</b>
31	34	-3	-9 %	\$217,918

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Cambios en las exportaciones de electricidad con el SER para el primer escenario (SJO-C fuera de servicio)**

<b>Exportación SER 1er. escenario [GWh]</b>	<b>Exportación SER programada [GWh]</b>	<b>Variación [GWh]</b>	<b>Variación [%]</b>	<b>Valorización de la variación [US\$]</b>
98	110	-12	-11 %	\$865,248

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Cambios en las importaciones de electricidad con México para el segundo escenario (SJO-C y JEN-C1 fuera de servicio)**

<b>Importación México 2do. escenario [GWh]</b>	<b>Importación México programada [GWh]</b>	<b>Variación [GWh]</b>	<b>Variación [%]</b>	<b>Valorización de la variación [US\$]</b>
128	66	62	93 %	\$4,499,739

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Cambios en las exportaciones de electricidad con México para el segundo escenario (SJO-C y JEN-C1 fuera de servicio)**

<b>Exportación México 2do. escenario [GWh]</b>	<b>Exportación México programada [GWh]</b>	<b>Variación [GWh]</b>	<b>Variación [%]</b>	<b>Valorización de la variación [US\$]</b>
15	26	-11	-41 %	\$789,473

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Cambios en las exportaciones de electricidad con el SER para el segundo escenario (SJO-C y JEN-C1 fuera de servicio)**

<b>Exportación SER 2do. escenario [GWh]</b>	<b>Exportación SER programada [GWh]</b>	<b>Variación [GWh]</b>	<b>Variación [%]</b>	<b>Valorización de la variación [US\$]</b>
49	84	-35	-42 %	\$2,554,891

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Cambios en las importaciones de electricidad con México para el tercer escenario (SJO-C, JEN-C1 y JEN-C2 fuera de servicio)**

<b>Importación México 3er. escenario [GWh]</b>	<b>Importación México programada [GWh]</b>	<b>Variación [GWh]</b>	<b>Variación [%]</b>	<b>Valorización de la variación [US\$]</b>
132	66	66	100 %	\$4,809,945

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Cambios en las exportaciones de electricidad con México para el tercer escenario (SJO-C, JEN-C1 y JEN-C2 fuera de servicio)**

<b>Exportación México 3er. escenario [GWh]</b>	<b>Exportación México programada [GWh]</b>	<b>Variación [GWh]</b>	<b>Variación [%]</b>	<b>Valorización de la variación [US\$]</b>
5	26	-22	-82 %	\$1,578,955

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Cambios en las exportaciones de electricidad con el SER para el tercer escenario (SJO-C, JEN-C1 y JEN-C2 fuera de servicio)**

<b>Exportación SER 3er. escenario [GWh]</b>	<b>Exportación SER programada [GWh]</b>	<b>Variación [GWh]</b>	<b>Variación [%]</b>	<b>Valorización de la variación [US\$]</b>
25	84	-59	-70 %	\$4,278,713

Fuente: elaboración propia.

#### **4.5. Demanda de electricidad desabastecida debido a la indisponibilidad de centrales térmicas que generan con base en combustibles fósiles**

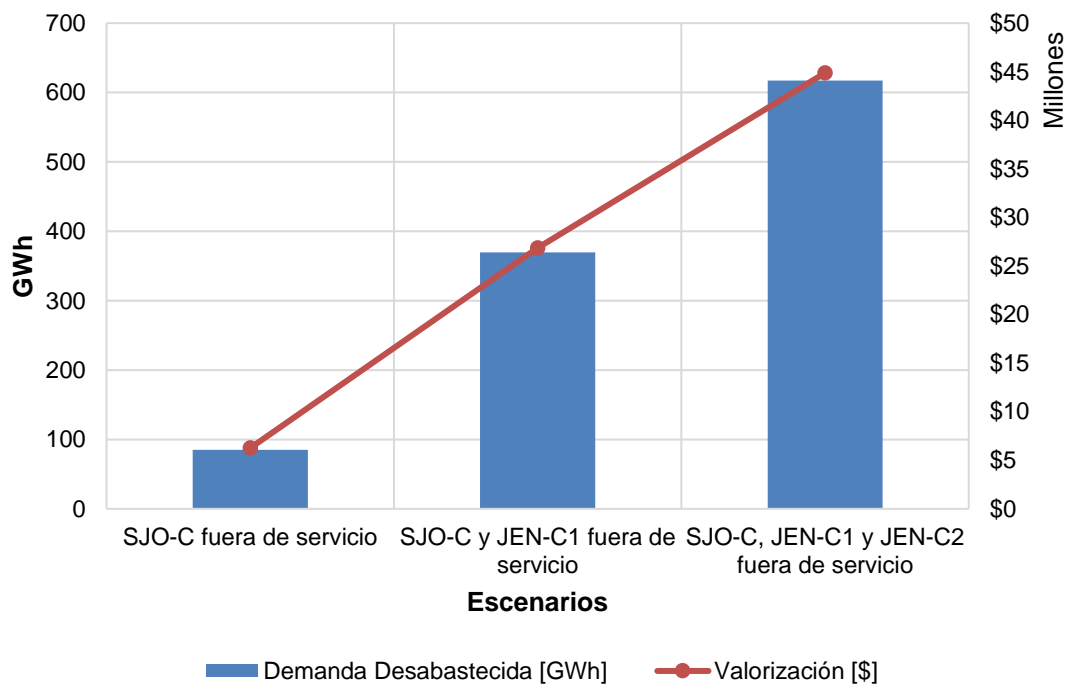
A continuación, se detalla para los tres escenarios analizados, la cantidad de demanda de electricidad desabastecida y su valorización monetaria en US\$ (tolerancia de convergencia de 1 kUS\$ y tolerancia relativa de convergencia de 0.1 %):

Tabla XXIII. **Demanda de electricidad desabastecida para cada escenario**

Escenarios	Demanda desabastecida [GWh]	Valorización [US\$]
SJO-C fuera de servicio	85	\$6,260,145
SJO-C y JEN-C1 fuera de servicio	370	\$26,874,165
SJO-C, JEN-C1 y JEN-C2 fuera de servicio	617	\$44,876,391

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Demanda de electricidad desabastecida para cada escenario**



Fuente: elaboración propia.





## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Antes de iniciar la discusión de los resultados obtenidos en el presente estudio de seguridad energética, es importante recalcar lo indicado en los dos capítulos anteriores respecto a la tolerancia utilizada para la obtención de todos los resultados. Fue inevitable que cierta cantidad de error ocurriera entre los valores obtenidos o medidos y los valores verdaderos estimados, sin embargo, es importante especificar el rango de error permitido.

La herramienta NCP tiene como fin fundamental realizar despachos de generación de electricidad al mínimo costo operativo posible (minimizar costos), si el usuario de esta así lo desea, por lo que su tolerancia de convergencia está dada en kUS\$ y su tolerancia relativa de convergencia en porcentaje, para lo cual se utilizaron valores de 1 y 0.1 respectivamente. Ambos valores fueron establecidos por el investigador, ya que pruebas previas e históricas del uso de la herramienta, además de consultas realizadas al fabricante de dicha herramienta, sugirieron que los valores óptimos para obtener los mejores resultados posibles y lo más apegados a la realidad, se lograban al utilizar los valores indicados anteriormente.

Con la explicación anterior se pretende evidenciar que los resultados obtenidos son muy confiables y valederos, con el respaldo del fabricante de la herramienta NCP, la experiencia del investigador y sobre todo el hecho de que en la actualidad las programaciones de despacho diario que realiza el Administrador del Mercado Mayorista son optimizadas con los valores de tolerancia mencionados. A continuación, se discutieron los resultados obtenidos para cada pregunta de investigación, tomando como base general que estos se

obtuvieron con una tolerancia de convergencia de 1 kUS\$ y una tolerancia relativa de convergencia de 0.1 %.

Respecto a la replicabilidad de los resultados obtenidos, debido a la naturaleza del estudio realizado, en el que cada una de las variables en estudio de cada pregunta de investigación fueron consecuencia de los despachos de generación de electricidad que consideraron escenarios de pérdida de generación de las centrales San José y Jaguar Energy, estos pueden ser replicados si el nuevo contexto que se desee analizar cuenta con las siguientes características: se utilice el precio *spot* o algún precio de corto plazo para la valorización de la electricidad y su metodología de cálculo sea consecuencia de la realización de un despacho económico de electricidad, lo cual involucra directamente a la variable de costo operativo.

Es menester también que el nuevo contexto por analizar, el cual podría ser otro país, cuente con interconexiones eléctricas para realizar transacciones internacionales de electricidad, además que su matriz energética sea sumamente dependiente de centrales que generen con base en combustibles fósiles y dependiente del mercado internacional de dichos combustibles. Finalmente, el nuevo investigador debe de contar con una herramienta confiable para realizar las simulaciones de despacho de electricidad en condiciones de déficit energético.

### **5.1. ¿Qué consecuencias tuvo el precio *spot* ante escenarios de pérdida de generación de las centrales San José y Jaguar Energy?**

San José y Jaguar Energy son generación base la mayor parte del tiempo, sobre todo en época seca y época de no zafra en Guatemala, esto debido al

valor de los CVG's de dichas centrales, los cuales rondan aproximadamente los 40 US\$/MWh. Ante escenarios de pérdida de generación de las centrales San José y Jaguar Energy, el ente operador del parque generador de electricidad de Guatemala se ve obligado a convocar a generar a centrales con CVG's más caros, en virtud que la prioridad sea siempre abastecer la demanda de electricidad en su totalidad, o en el peor de los casos, la mayor cantidad posible de dicha demanda.

El cálculo del precio *spot* es consecuencia y es totalmente dependiente del despacho del parque generador de electricidad, ya sea en condiciones normales de operación o de déficit energético, lo cual refleja una disminución o aumento de este dependiendo los escenarios analizados.

En consecuencia, al estresar al parque generador de electricidad de Guatemala por medio de la limitación de la participación de las centrales San José y Jaguar Energy, el precio *spot* presenta una tendencia positiva, llegando en el escenario más crítico, el cual es el tercer escenario (ver tabla VII de la sección de Resultados), hasta una variación del 110.07 % respecto al precio *spot* programado en condiciones normales de operación, como se observa en la tabla X de la sección de resultados.

Un aumento tan grande en el precio *spot* o precio de corto plazo de electricidad de un país, puede ser indicador de la dependencia de recursos energéticos provenientes de países vecinos o de otras regiones, como son las importaciones de electricidad y los combustibles fósiles respectivamente, lo cual es un hecho negativo que podría afectar el desarrollo económico de un país.

## **5.2. ¿Cómo se afectó el costo operativo del parque generador de electricidad debido a la indisponibilidad de diferentes bloques de generación?**

Como se mencionó en la subsección anterior, San José y Jaguar Energy son generación base la mayor parte del tiempo, por lo que diferentes escenarios de indisponibilidad de dichas centrales ocasionan que el ente operador del parque generador de electricidad de Guatemala convoque a generar a centrales más caras, esto para abastecer en su totalidad o parcialmente, dependiendo del caso, a la demanda de electricidad. El costo operativo del parque generador de electricidad de Guatemala, como se mencionó en el marco teórico del presente estudio, engloba diferentes costos en los que se incurre para el abastecimiento de demanda de electricidad, siendo algunos de estos los costos operativos de las centrales de generación de diferentes tecnologías.

El costo operativo total es consecuencia y es totalmente dependiente, al igual que el precio *spot*, del despacho de electricidad del parque generador y de las condiciones en las que este se realice, ya sea en condiciones normales o de déficit energético, lo que repercute en una disminución o aumento respectivamente. Al evaluar el escenario más crítico que se analizó en el presente estudio, el aumento del costo operativo llegó hasta una variación del 52.53 % respecto al costo operativo programado en condiciones normales de operación del parque generador de electricidad, como se observa en la tabla XIII de la sección de resultados.

La normativa vigente que rige al subsector eléctrico guatemalteco expone entre sus objetivos principales que la operación del parque generador de electricidad del país debe de realizarse al mínimo costo operativo posible, por lo que el déficit energético que pueda llegar a ocasionar la pérdida de generación

de las centrales San José y Jaguar Energy se interpone de gran manera en el cumplimiento de dicho objetivo.

**5.3. ¿Qué cambios tuvieron las transacciones internacionales debido a los escenarios de déficit energético en el parque generador de electricidad?**

El déficit energético en el parque generador de electricidad ocasiona que se aumente la dependencia de recursos energéticos provenientes de países vecinos, como es el caso de las importaciones de electricidad provenientes de México, aun cuando dichas importaciones sean de CVG's más elevados. Respecto a las exportaciones de electricidad que realiza Guatemala hacia México y Centroamérica, al evaluar escenarios de déficit energético, a tal punto los recursos nacionales y los obtenidos fuera de las respectivas fronteras, llegan a ser insuficientes para abastecer dichas exportaciones.

Para el escenario más crítico que se evaluó, se aumentaron las importaciones de electricidad provenientes de México hasta una variación aproximada del 100 %, lo cual involucró una valorización monetaria de US\$4,809,945 (ver tabla XX de la sección de resultados), aumento que también repercutió en el costo operativo total del parque generador de electricidad de Guatemala.

Para el caso de las exportaciones de electricidad hacia México y Centroamérica, la disminución de exportaciones hacia México llegó hasta una variación de 82 % con una valorización de US\$1,578.955 (ver tabla XXI de la sección de Resultados) y la disminución de exportaciones hacia Centroamérica llegó hasta una variación de 70 % con una valorización de US\$4,278,713 (ver tabla XXII de la sección de resultados).

Adicional al aumento considerable del costo operativo del parque generador de electricidad de Guatemala debido al aumento de importaciones de electricidad provenientes de México, son evidentes las pérdidas económicas para el país debido a la reducción de exportaciones de electricidad hacia México y Centroamérica.

**5.4. ¿Qué cantidad de demanda de electricidad se desabasteció debido a la indisponibilidad de centrales térmicas que generan con base en combustibles fósiles?**

Con base en los escenarios analizados que se detallaron en la tabla VII de la sección de Resultados, se observó que el parque generador de electricidad de Guatemala es sumamente dependiente de las centrales San José y Jaguar Energy para abastecer la demanda de electricidad del país. Se evidenció la dependencia del parque generador de electricidad de Guatemala del mercado internacional de combustibles fósiles y la periodicidad de arribos de estos al país, lo cual se observa en el apéndice 4, debido a la limitación de energía y la indisponibilidad de centrales que utilizan dichos combustibles para generar electricidad.

Cada uno de los escenarios analizados dieron como resultado demanda de electricidad desabastecida, la cual también fue valorizada monetariamente. La demanda de electricidad desabastecida tuvo un comportamiento al alza dependiendo de lo crítico del escenario analizado, como se observa en la tabla XXIII de la sección de Resultados y esto repercutió también en el comportamiento al alza de las pérdidas económicas correspondientes a la demanda de electricidad desabastecida.

Para el escenario más crítico la demanda de electricidad desabastecida llegó hasta 617 GWh con una valorización de US\$44,876,391 (ver tabla XXIII de la sección de Resultados), que evidencia la suma importancia de las exportaciones de electricidad para los ingresos económicos de Guatemala.

#### **5.5. ¿Qué repercusiones tuvo el parque generador de electricidad de Guatemala ante escenarios de pérdida de generación de las centrales San José y Jaguar Energy?**

Las repercusiones en el parque generador de electricidad ante los escenarios analizados fueron evidenciadas en las cuatro subsecciones anteriores, en las que se observó que dichas repercusiones fueron negativas para todos los casos analizados. El precio *spot* varió considerablemente al alza debido a la indisponibilidad de las centrales San José y Jaguar Energy, lo que ocasionó la convocatoria de centrales de generación más caras para el abastecimiento de la demanda de electricidad. El mismo caso se presentó para el costo operativo del parque generador de electricidad, que también aumentó considerablemente debido a los escenarios de déficit energético analizados.

También se puede mencionar que las importaciones de electricidad con México tuvieron un aumento considerable, evidenciándose que la dependencia energética de países vecinos también aumentó al contar con déficit energético en el país, lo que también impactó en el costo operativo total del parque generador de electricidad.

Para el caso de la demanda de electricidad de exportaciones y a nivel nacional, el desabastecimiento obtenido y por ende las pérdidas económicas fueron sumamente significativas y que se pueden tomar como referencia para observar la importancia de las transacciones internacionales que realiza

Guatemala con países vecinos y la cantidad considerable de usuarios que se podrían quedar sin servicio de electricidad, teniéndose repercusiones directas en el desarrollo en general del país.

Por medio de los resultados obtenidos se logró obtener la base para elaborar las recomendaciones que fueron el fin principal del estudio realizado, para contribuir con mejorar la seguridad energética del país y minimizar la dependencia energética internacional, todo a un costo que un país en vías de desarrollo esté dispuesto a asumir.



## CONCLUSIONES

1. Las repercusiones en el parque generador de electricidad de Guatemala ante escenarios de pérdida de generación de las centrales San José y Jaguar Energy fueron negativas, debido a que se tuvieron aumentos y desestabilizaciones sumamente considerables en el precio *spot*, en el costo operativo, en las importaciones de electricidad con México, además del desabastecimiento de demanda nacional de electricidad y de exportaciones con países vecinos.
2. El precio *spot* para el primer escenario evaluado aumentó en un 81.82 %; para el segundo escenario aumentó en un 98.52 % y para el tercer escenario aumentó en un 110.07 %. Para los tres escenarios evaluados, el aumento fue respecto al precio *spot* programado en condiciones normales de operación.
3. El costo operativo para el primer escenario evaluado aumentó en un 28.08 %; para el segundo escenario aumentó en un 31.66 % y para el tercer escenario aumentó en un 52.53 %. Para los tres escenarios evaluados, el aumento fue respecto al costo operativo programado en condiciones normales de operación.
4. Para el primer escenario evaluado, las importaciones de electricidad con México aumentaron en un 61 %, representando un aumento en el costo operativo de US\$3,908,332; las exportaciones de electricidad con México se redujeron en un 9 %, representando pérdidas económicas para Guatemala de US\$217,918; las exportaciones de electricidad con

Centroamérica se redujeron en un 11 %, representando pérdidas económicas para Guatemala de US\$865,248.

5. Para el segundo escenario evaluado, las importaciones de electricidad con México aumentaron en un 93 %, representando un aumento en el costo operativo de US\$4,499,739; las exportaciones de electricidad con México se redujeron en un 41 %, representando pérdidas económicas para Guatemala de US\$789,473 y las exportaciones de electricidad con Centroamérica se redujeron en 42 %, representando pérdidas económicas para Guatemala de US\$2,554,891.
6. Para el tercer escenario evaluado, las importaciones de electricidad con México aumentaron en un 100 %, representando un aumento en el costo operativo de US\$4,809,945; las exportaciones de electricidad con México se redujeron en un 82 %, representando pérdidas económicas para Guatemala de US\$1,578,955 y las exportaciones de electricidad con Centroamérica se redujeron en un 70 %, representando pérdidas económicas para Guatemala de US\$4,278,713. Para los tres escenarios evaluados, las variaciones fueron respecto a las transacciones internaciones de electricidad programadas en condiciones normales de operación.
7. Para el primer escenario evaluado se desabastecieron aproximadamente 85 GWh de demanda de electricidad con una valorización de US\$6,260,145 en pérdidas para Guatemala; para el segundo escenario evaluado se desabastecieron aproximadamente 370 GWh de demanda de electricidad con una valorización económica de US\$26,874,165 en pérdidas para Guatemala y para el tercer escenario evaluado se

desabastecieron aproximadamente 617 GWh con una valorización económica de US\$44,876,391 en pérdidas para Guatemala.

8. El escenario más crítico analizado, en el cual se encontraban indisponibles inicialmente las unidades SJO-C, JEN-C1 y JEN-C2, provocó una indisponibilidad total en el parque generador de electricidad de Guatemala de aproximadamente 950 MW al final del análisis, lo cual evidencia el gran porcentaje que representan las unidades en mención, respecto a la capacidad efectiva total instalada en el parque generador de electricidad del país.
  
9. Se esperaba que, para el escenario más crítico evaluado, los días que tardarían en quedar indisponibles todas las centrales generadoras de electricidad que utilizaron bunker de arranque rápido y diésel para ingresar a línea, fuera la menor cantidad respecto a los otros dos escenarios evaluados, sin embargo, tanto para el segundo y el tercer escenario (el más crítico) la cantidad de días fue la misma (23 días), esto debido a la periodicidad de arribos de combustibles fósiles al país.



## RECOMENDACIONES

1. Proponer por parte del Administrador del Mercado Mayorista, como el ente operador del parque generador de electricidad de Guatemala, propuestas normativas a la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, según sugerencias propias y de los diferentes agentes del subsector eléctrico guatemalteco, para regular el correcto y mínimo abastecimiento de combustibles fósiles de las centrales térmicas, esto con el fin de contribuir a mejorar la seguridad energética del país. Las propuestas normativas realizadas podrían enfocarse en la equiparación de intereses de la oferta y la demanda, es decir, que se reconozca a los agentes generadores térmicos el costo justo de mantener un inventario de combustibles para el aseguramiento del abastecimiento de la demanda de electricidad, lo cual podría agregarse a la normativa actual correspondiente a la reserva fría.
2. Contribuir desde el Ministerio de Energía y Minas, por ser el ente rector del subsector eléctrico de Guatemala y el encargado de elaborar los diferentes planes indicativos concernientes al futuro de la generación y transmisión de electricidad en el país, en la aceptación y elaboración de planes energéticos integrales, que puedan llegar a ser la base para mejorar la seguridad energética del parque generador de electricidad.
3. Efectuar más estudios de seguridad energética del parque generador de electricidad de Guatemala ante otros escenarios críticos, como la dependencia de las importaciones de electricidad con México o la dependencia de la central hidroeléctrica Chixoy.

4. Realizar otro estudio con orientación técnica (comportamiento del voltaje, frecuencia, flujos de potencia, entre otros parámetros) de las repercusiones que podría tener el parque generador de electricidad de Guatemala antes, durante y después de los escenarios de pérdida de generación de las centrales San José y Jaguar Energy.
  
5. Dar seguimiento por parte de las entidades gubernativas de Guatemala, a las diferentes actividades que colaboran con el desarrollo económico del país, como lo es el abastecimiento de electricidad que podría llegar a verse afectado por la dependencia de combustibles fósiles de otros países.

## REFERENCIAS

1. Administrador del Mercado Mayorista. (2000). *Norma de coordinación comercial No. 4 precio de oportunidad de la energía. Resolución 157-02*. Administrador del Mercado Mayorista, Guatemala.
2. Administrador del Mercado Mayorista. (2002). *Norma de coordinación comercial No. 10 exportación e importación de energía eléctrica. Resolución No. 300-01*. Administrador del Mercado Mayorista, Guatemala.
3. Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE). (2017). *Energías no renovables*. Divulgación Escolar, Uruguay.
4. Blanco, N., Zúñiga, C., Torre, J., Arce, E., Martínez, E., Quiros, R. y otros. (2015). *Análisis de seguridad y productividad del suministro de energía eléctrica en el sistema eléctrico de Nicaragua en el periodo comprendido desde el año 2010 hasta el 2018*. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Nicaragua.
5. Escribano, G. (2014). *La seguridad energética española en un escenario en transición*. Cuadernos de Estrategia, España.
6. Felipe, B. (2016). *Optimización del despacho de generación para corto plazo con simulación de escenarios en época seca y época lluviosa, considerando la incorporación de centrales eólicas al SNI*

*de Guatemala* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

7. Leal, E. (2005). *Despacho económico de carga considerando restricciones en la red de transporte con el uso de técnicas de programación lineal* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
8. Martínez, V. (2017). *La diversificación energética en Colombia desde la política pública*. 41-41. Publicaciones de Facultad de Filosofía y Letras, Argentina.
9. Molina, J., Martínez, V. y Rudnick, H. (2005). *Indicadores de Seguridad Energética: Aplicación al Sector Energético de Chile*. Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.
10. Power System Research. (2019). *Modelo Nuevo Corto Plazo. Manual de usuario*. Power System Research, Brasil.
11. Red Eléctrica de España. (2009). *El suministro de electricidad*. Domènech e-learning multimedia, S.A, España.
12. Rodríguez, V. (2018). *Seguridad energética Análisis y evaluación del caso de México*. Publicación de las Naciones Unidas, México.
13. Ruiz, A. (2007). *La seguridad energética de América Latina y el Caribe en el contexto mundial*. División de Recursos Naturales e Infraestructura Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Chile.



14. Saavedra, R. (2016). *Transacciones internacionales de electricidad en Colombia. Impactos a la demanda interna. Documentos Facultad de Ciencias Económicas-Centro de Investigaciones para el Desarrollo Escuela de Economía*. Centro Editorial Facultad de Ciencias Económicas-Centro de Investigaciones para el Desarrollo, Colombia.
  
15. Sontay, D. (2011). *Optimización del despacho hidrotérmico estocástico del SNI para un estudio de largo plazo* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.



## APÉNDICES

Apéndice 1. **Recopilación de datos primer escenario**

<b>POE</b>	<b>Costo operativo</b>	<b>México (r)</b>	<b>México (i)</b>	<b>SER (i)</b>	<b>Energía no suministrada</b>
\$116	\$2,503,844	2880	1456	3928	0
\$118	\$2,506,973	2880	1456	3928	0
\$126	\$2,532,095	3804	1456	3928	0
\$122	\$2,518,560	3211	1456	3928	0
\$125	\$2,534,496	4176	1456	3928	0
\$104	\$1,895,060	2880	267	2909	0
\$104	\$1,895,036	2880	267	2909	0
\$132	\$2,556,222	5161	1456	3928	0
\$131	\$2,558,045	5156	1456	3928	0
\$131	\$2,558,045	5156	1456	3928	0
\$131	\$2,558,045	5156	1456	3928	0
\$131	\$2,558,045	5156	1456	3928	0
\$104	\$1,895,036	2880	267	2909	0
\$104	\$1,895,036	2880	267	2909	0
\$131	\$2,558,045	5156	1456	3928	0
\$131	\$2,558,045	5156	1456	3928	0
\$131	\$2,558,045	5156	1456	3928	0
\$131	\$2,558,045	5156	1456	3928	0
\$138	\$2,631,810	5760	1456	3928	0
\$123	\$2,099,298	4791	267	2909	0
\$125	\$2,086,843	4995	267	2909	0
\$253	\$2,708,948	5760	1076	2435	1873
\$245	\$2,691,589	5760	971	2447	8054
\$138	\$2,278,729	5760	937	1692	25797
\$139	\$2,456,652	5760	1160	2538	6228
\$139	\$2,456,652	5760	1160	2538	6228
\$122	\$2,120,966	4347	267	2909	0
\$122	\$2,120,966	4347	267	2909	0

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Recopilación de datos segundo escenario**

<b>POE</b>	<b>Costo operativo</b>	<b>México (r)</b>	<b>México (i)</b>	<b>SER (i)</b>	<b>Energía no suministrada</b>
\$124	\$2,747,544	3419	1456	3928	0
\$171	\$2,941,068	5760	1456	3928	0
\$208	\$2,952,372	5760	1160	3840	384
\$137	\$2,822,311	5760	1456	3916	12
\$196	\$2,883,312	5760	1127	3732	525
\$135	\$2,171,087	5282	267	2909	0
\$135	\$2,169,359	5193	267	2909	0
\$137	\$2,480,776	5760	1022	1733	23685
\$137	\$2,480,776	5760	1022	1733	23685
\$137	\$2,480,776	5760	1022	1733	23685
\$137	\$2,480,776	5760	1022	1733	23685
\$137	\$2,480,776	5760	1022	1733	23685
\$135	\$2,171,087	5282	267	2909	0
\$135	\$2,171,087	5282	267	2909	0
\$137	\$2,480,776	5760	1022	1733	23685
\$137	\$2,480,776	5760	1022	1733	23685
\$136	\$2,399,970	5760	426	1694	27579
\$143	\$2,288,356	5760	0	310	33026
\$143	\$2,288,356	5760	0	310	33026
\$140	\$2,005,969	5760	96	1368	21231
\$140	\$2,005,969	5760	96	1368	21231
\$143	\$2,613,681	5760	0	29	36330
\$138	\$2,587,098	5760	0	895	30541

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Recopilación de datos tercer escenario**

<b>POE</b>	<b>Costo operativo</b>	<b>México (r)</b>	<b>México (i)</b>	<b>SER (i)</b>	<b>Energía no suministrada</b>
\$138	\$3,043,274	5685	1456	3928	0
\$272	\$2,881,584	5760	908	1359	27433
\$283	\$2,717,827	5760	243	1118	29702
\$140	\$2,696,370	5760	689	1640	27370
\$139	\$2,497,588	5760	0	991	30072
\$142	\$2,508,419	5760	104	1819	14401
\$142	\$2,511,910	5760	104	1879	16033
\$140	\$2,827,583	5760	132	1048	30256

Continuación apéndice 3.

<b>POE</b>	<b>Costo operativo</b>	<b>México (r)</b>	<b>México (i)</b>	<b>SER (i)</b>	<b>Energía no suministrada</b>
\$140	\$2,827,583	5760	132	1048	30256
\$140	\$2,827,583	5760	132	1048	30256
\$140	\$2,827,583	5760	132	1048	30256
\$140	\$2,827,583	5760	132	1048	30256
\$142	\$2,508,419	5760	104	1819	14401
\$142	\$2,508,419	5760	104	1819	14401
\$140	\$2,827,583	5760	132	1048	30256
\$140	\$2,827,583	5760	132	1048	30256
\$143	\$2,769,981	5760	0	39	35663
\$143	\$3,134,069	5760	0	216	34519
\$143	\$3,134,069	5760	0	216	34519
\$143	\$2,651,186	5760	0	598	24980
\$143	\$2,651,186	5760	0	598	24980
\$143	\$3,250,190	5760	0	0	38523
\$143	\$4,296,923	5760	0	0	38523

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Recopilación de datos tercer escenario**

<b>Central</b>	<b>Energía disponible al final del día [GWh]</b>	<b>Fecha de arribo de combustibles</b>	<b>Días faltantes para el arribo de combustibles</b>	<b>Energía disponible del arribo [GWh]</b>
ARI-O	55	30/06/2019	34	18
ECR-B	0	02/06/2019	6	0
ELG-B	0	30/05/2019	3	1
GEN-B	0	29/05/2019	2	0
GGO-B	0	29/05/2019	2	0
LPA-B	1	31/12/2019	218	0
PQP-B	5	28/06/2019	32	3
TDL-B	0	30/05/2019	3	2
TER-B	0	29/05/2019	2	0
ESC-G5	2	01/10/2019	127	1
S&S-D	0	31/12/2019	218	0

Continuación apéndice 4.

<b>Central</b>	<b>Energía disponible al final del día [GWh]</b>	<b>Fecha de arribo de combustibles</b>	<b>Días faltantes para el arribo de combustibles</b>	<b>Energía disponible del arribo [GWh]</b>
ESC-G5	2	01/10/2019	127	1
S&S-D	0	31/12/2019	218	0
TAM-G	0	30/05/2019	3	1

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Recopilación de datos tercer escenario**

<b>Central</b>	<b>Energía disponible al final del día [GWh]</b>	<b>Fecha de arribo de combustibles</b>	<b>Días faltantes para el arribo de combustibles</b>	<b>Energía disponible del arribo [GWh]</b>
ARI-O	55	30/06/2019	34	18
ECR-B	0	02/06/2019	6	0
ELG-B	0	30/05/2019	3	1
GEN-B	0	29/05/2019	2	0
GGO-B	0	29/05/2019	2	0
LPA-B	1	31/12/2019	218	0
PQP-B	5	28/06/2019	32	3
TDL-B	0	30/05/2019	3	2
TER-B	0	29/05/2019	2	0
ESC-G	2	01/10/2019	127	1
S&S-D	0	31/12/2019	218	0
TAM-G	0	30/05/2019	3	1

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Recopilación de datos segundo escenario**

<b>Central</b>	<b>Energía disponible al final del día [GWh]</b>	<b>Fecha de arribo de combustibles</b>	<b>Días faltantes para el arribo de combustibles</b>	<b>Energía disponible del arribo [GWh]</b>
ARI-O	55	30/06/2019	34	18
ECR-B	0	02/06/2019	6	0
ELG-B	0	30/05/2019	3	1

Continuación apéndice 6.

<b>Central</b>	<b>Energía disponible al final del día [GWh]</b>	<b>Fecha de arribo de combustibles</b>	<b>Días faltantes para el arribo de combustibles</b>	<b>Energía disponible del arribo [GWh]</b>
GEN-B	0	29/05/2019	2	0
GGO-B	0	29/05/2019	2	0
LPA-B	1	31/12/2019	218	0
PQP-B	5	28/06/2019	32	3
TDL-B	0	30/05/2019	3	2
TER-B	0	29/05/2019	2	0
ESC-G	2	01/10/2019	127	1
S&S-D	0	31/12/2019	218	0
TAM-G	1	30/05/2019	3	1

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Recopilación de datos segundo escenario**

<b>Central</b>	<b>Energía disponible al final del día [GWh]</b>	<b>Fecha de arribo de combustibles</b>	<b>Días faltantes para el arribo de combustibles</b>	<b>Energía disponible del arribo [GWh]</b>
ARI-O	51	30/06/2019	33	18
ECR-B	0	02/06/2019	5	0
ELG-B	0	30/05/2019	2	1
GEN-B	0	29/05/2019	1	0
GGO-B	0	29/05/2019	1	0
LPA-B	0	31/12/2019	217	0
PQP-B	5	28/06/2019	31	3
TDL-B	0	30/05/2019	2	2
TER-B	0	29/05/2019	1	0
ESC-G	2	01/10/2019	126	1
S&S-D	0	31/12/2019	217	0
TAM-G	0	30/05/2019	2	1

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Recopilación de datos primer escenario**

<b>Central</b>	<b>Energía disponible al final del día [GWh]</b>	<b>Fecha de arribo de combustibles</b>	<b>Días faltantes para el arribo de combustibles</b>	<b>Energía disponible del arribo [GWh]</b>
ARI-O	55	30/06/2019	34	18
ECR-B	0	02/06/2019	6	0
ELG-B	1	30/05/2019	3	1
GEN-B	1	29/05/2019	2	0
GGO-B	1	29/05/2019	2	0
LPA-B	1	31/12/2019	218	0
PQP-B	5	28/06/2019	32	3
TDL-B	0	30/05/2019	3	2
TER-B	1	29/05/2019	2	0
ESC-G	2	01/10/2019	127	1
S&S-D	0	31/12/2019	218	0
TAM-G	1	30/05/2019	3	1

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Recopilación de datos primer escenario**

<b>Central</b>	<b>Energía disponible al final del día [GWh]</b>	<b>Fecha de arribo de combustibles</b>	<b>Días faltantes para el arribo de combustibles</b>	<b>Energía disponible del arribo [GWh]</b>
ARI-O	52	30/06/2019	33	18
ECR-B	0	02/06/2019	5	0
ELG-B	0	30/05/2019	2	1
GEN-B	0	29/05/2019	1	0
GGO-B	1	29/05/2019	1	0
LPA-B	0	31/12/2019	217	0
PQP-B	5	28/06/2019	31	3
TDL-B	0	30/05/2019	2	2
TER-B	0	29/05/2019	1	0
ESC-G	2	01/10/2019	126	1
S&S-D	0	31/12/2019	217	0
TAM-G	1	30/05/2019	2	1

Fuente: elaboración propia.