



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN 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**

Victor Hugo Lutín Sandoval

Asesorado por el MSc. Ing. Rubén Alfredo Cerón Suchini

Guatemala, marzo de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN 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

VICTOR HUGO LUTÍN SANDOVAL

ASESORADO POR EL MSC. ING. RUBÉN ALFREDO CERÓN SUCHINI

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, MARZO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Saúl Cabezas Durán
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
EXAMINADOR	Ing. Carlos Alberto Navarro Fuentes
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN 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.



Victor Hugo Lutín Sandoval

Ref. EEPFI-069-2020
Guatemala, 27 de enero de 2020

Director
Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Presente.

Estimado Ing. Rivera:

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante **Victor Hugo Lutín Sandoval** carné número **201325526**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en Artes en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados.

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

Sin otro particular,

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Rubén Alfredo Cerón Suchini
INGENIERO ELECTRICISTA
COLEGIADO No. 7803

Mtro. Rubén Alfredo Cerón Suchini
Asesor

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

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





FIME-001-2020
Guatemala, febrero de 2020

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **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 estudiante universitario Víctor Hugo Lutín Sandoval, considerando que el protocolo es viable para realizar el Proceso de Graduación procedo con el AVAL, ya que cumple los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Director

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica



Universidad de San Carlos
De Guatemala

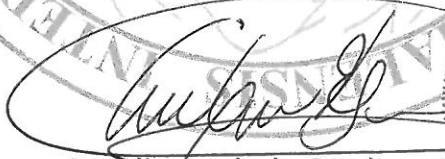


Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.111-2020

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN 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 estudiante universitario: **Victor Hugo Lutín Sandoval**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, marzo de 2020

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

- 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.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por formarme a nivel académico y darme las herramientas necesarias para desenvolverme profesionalmente. Eternamente agradecido con mi <i>alma mater</i> .
Facultad de Ingeniería	Por inculcarme los valores académicos más importantes para mí, sobre todo la perseverancia y la responsabilidad.
Escuela de Estudios de Postgrado	Por darme la oportunidad de culminar mi carrera de pregrado y a la vez permitirme seguir creciendo intelectualmente a nivel de postgrado.
Mi asesor	Rubén Cerón, por compartir todo su conocimiento conmigo, además de su apoyo incondicional.
Administrador del Mercado Mayorista	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.
Mis amigos en general	Por todas las experiencias vividas dentro y fuera de las aulas, miles de gracias por todo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
3.1. Contexto general	7
3.2. Descripción del problema	7
3.3. Formulación del problema	10
3.4. Delimitación del problema	10
3.4.1. Delimitación contextual	11
3.4.2. Delimitación geográfica	11
3.4.3. Delimitación histórica	11
4. JUSTIFICACIÓN	13
5. OBJETIVOS	15
5.1. Objetivo general	15
5.2. Objetivos específicos.....	15
6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	17

7.	MARCO TEÓRICO	19
7.1.	Seguridad energética	20
7.1.1.	Concepto de seguridad energética.....	20
7.1.2.	Diversidad energética.....	20
7.1.3.	Seguridad energética en sistemas eléctricos	21
7.2.	Recursos energéticos no renovables	22
7.2.1.	Petróleo	23
7.2.2.	Gas natural.....	24
7.2.3.	Carbón mineral.....	25
7.3.	Parques generadores de electricidad.....	25
7.3.1.	Tecnologías de producción de electricidad	26
7.3.2.	Importaciones de electricidad.....	29
7.3.3.	Demanda de electricidad.....	30
7.4.	Despacho económico de electricidad.....	31
7.4.1.	Programación lineal.....	31
7.4.2.	Función objetivo	32
7.4.3.	Herramienta Nuevo Corto Plazo.....	33
7.5.	Indicadores económicos de electricidad.....	35
7.5.1.	Precio <i>spot</i>	35
7.5.2.	Costos variables de generación	36
7.5.3.	Costo operativo	37
8.	ÍNDICE PROPUESTO DE CONTENIDOS.....	39
9.	METODOLOGÍA	41
9.1.	Características del estudio	41
9.1.1.	Diseño	41
9.1.2.	Enfoque.....	41
9.1.3.	Alcance.....	42

9.1.4.	Unidad de análisis	42
9.2.	Variables.....	43
9.3.	Fases del estudio	44
9.3.1.	Fase 1.....	44
9.3.2.	Fase 2.....	44
9.3.3.	Fase 3.....	45
9.3.4.	Fase 4.....	46
9.3.5.	Fase 5.....	47
9.4.	Resultados esperados	48
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	49
10.1.	Muestreo no probabilístico.....	49
10.2.	Análisis univariado.....	50
10.3.	Análisis aritmético y estadístico.....	51
10.4.	Simulaciones y despachos de electricidad	52
11.	CRONOGRAMA.....	53
12.	FACTIBILIDAD TÉCNICA Y FINANCIERA	55
12.1.	Valorización de recursos proporcionados por el Administrador del Mercado Mayorista	56
13.	REFERENCIAS.....	57

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Árbol de problemas	9
2. Esquema de solución	17
3. Capacidad instalada de tecnologías renovables de generación de electricidad en época de zafra para el año 2019 en Guatemala	21
4. Clasificación de las fuentes de energía	22
5. Equilibrio generación – demanda	26
6. ¿Cómo se produce electricidad?	27
7. Capacidad instalada del parque generador de electricidad de Guatemala incluyendo capacidad de importaciones con México	28
8. Curva de demanda nacional proyectada de Guatemala.....	30
9. Proceso de decisión para sistemas hidrotérmicos.....	33
10. Interfaz gráfica del Nuevo Corto Plazo	34
11. Comportamiento del precio <i>spot</i> proyectado en Guatemala.....	36
12. Cronograma de actividades.....	53

TABLAS

I. Países con más reservas de petróleo en el mundo 2015.....	24
II. Clasificación del carbón mineral.....	25
III. Interconexiones internacionales de Guatemala en 2019.....	29
IV. Costos operativos del parque generador de electricidad de Guatemala ..	38
V. Definición teórica y operativa de variables	43

VI. Clasificación de las variables	43
VII. Recursos necesarios.....	55
VIII. Recursos proporcionados por el AMM	56

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
US\$/día	Dólares al día
US\$/MWh	Dólares por megavatio-hora
F	Función objetivo
i	Índice de sumatoria
x_i	i-ésima variable en estudio
kcal/kg	Kilocaloría por kilogramo
k\$	Kilodólares
kWh	Kilovatio-hora
kV	Kilovoltio
\bar{x}	Media aritmética
MW	Megavatio
MWh/día	Megavatio-hora al día
n	Suma de cantidad de valores de la variable
Σ	Sumatoria
x	Variable en estudio

GLOSARIO

AMM	Administrador del Mercado Mayorista. Entidad encargada de la operación técnica y comercial del mercado mayorista en Guatemala.
Cuasiexperimental	Se refiere a diseños de investigación experimentales en los cuales los sujetos o grupos de sujetos de estudio no están asignados aleatoriamente.
CVG	Costo Variable de Generación. Es el costo en el que incurre una central generadora de electricidad al producir un megavatio-hora.
Embalse	Depósito de agua que se forma de manera artificial, en el cual se almacena agua de un río o de un arroyo.
Encarecimiento	Aumento del precio de un producto, servicio o factor económico.
Exploratorio	Tipo de investigación utilizada para estudiar un problema que no está claramente definido.

Generación base	Tecnologías de generación de electricidad que, por ser muy económicas, son despachadas la mayor parte del tiempo.
Hidroeléctrica	Infraestructura que utiliza la energía hidráulica para generar energía eléctrica.
Indisponibilidad	Tiempo durante el cual unidades generadoras permanecen fuera de servicio debido a mantenimientos programados o salidas forzadas.
Matriz energética	Radiografía de cómo está balanceado el consumo de energía eléctrica entre distintas fuentes en un periodo de tiempo.
Microsoft Excel	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.
Muestreo	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.
NCC	Norma de Coordinación Comercial. Norma utilizada para la coordinación comercial del mercado mayorista en Guatemala.

NCP	Nuevo Corto Plazo. Herramienta utilizada para optimizar sistemas hidrotérmicos de generación de electricidad.
Orden de mérito	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.
POE	Precio de Oportunidad de la Energía. Precio utilizado para valorizar las transacciones de electricidad de corto plazo.
Programación	Previsión del despacho de generación de un parque generador, la cual puede ser elaborada para diferentes horizontes de tiempo a futuro.
PSR	Power System Research. Suministrador de soluciones tecnológicas y servicios de consultoría técnica en los sectores de energía eléctrica y de gas natural.
Reservorio	Sistema termodinámico que cede energía en forma de calor, trabajo o bien proporciona partículas.
RRa	Reserva Rápida. Servicio complementario que tiene como objetivo contar con capacidad de potencia para cubrir desbalances de generación y demanda provocados por imprevistos importantes.

RRO	Reserva Rodante Operativa. Servicio complementario que tiene como finalidad la regulación secundaria de frecuencia y que esté disponible para otros requerimientos operativos.
SER	Sistema Eléctrico Regional. Sistema eléctrico que interconecta a Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica y Panamá.
Termoeléctrica	Instalación empleada en la generación de energía eléctrica a partir de la energía liberada por combustibles fósiles.
Univariado	Análisis de cada una de las variables por separado, es decir, análisis basado en una sola variable.
UTE	Administración 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.

1. INTRODUCCIÓN

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

El primer capítulo del estudio propuesto tratará de contextualizar al lector por medio de la presentación de los antecedentes asociados a estudios de seguridad energética en Guatemala, lo cual tiene como fin dar a conocer la necesidad de realizar un estudio de esta índole para el parque generador de electricidad del país.

El segundo capítulo presenta el planteamiento del problema a tratar y que se tratará de resolver, el cual se circunscribe en Guatemala y toma en consideración a países vecinos por las transacciones internacionales de electricidad que se realizan con estos. Dicho planteamiento será el fundamento para la realización del estudio de seguridad energética de Guatemala.

El tercer capítulo es muy importante, ya que proporciona la información teórica y que será el cimiento para conceptualizar y fundamentar la obtención de la información a utilizar para el estudio, la selección de los escenarios a

analizar, la obtención de los resultados y así poder concluir y recomendar con base a la teoría presentada y la experiencia que pueda tener el investigador.

Finalmente, el capítulo cuarto detalla la obtención de los resultados a analizar, partiendo de la obtención de los insumos para realizar los despachos de generación electricidad, hasta las comparaciones que se desean realizar y que podrán utilizarse para evidenciar lo importante que es contar con seguridad energética en Guatemala, que pueda continuar contribuyendo con el desarrollo del país.

2. ANTECEDENTES

(Molina, Martínez y Rudnick, 2005) afirmaron 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 de todos sus consumidores.

(Escribano, 2014) planteó 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 que 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 es 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 presente, 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) mencionó 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, 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) indicó 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 del país.

(Blanco, et al., 2015) indicaron 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 requiere electricidad, desde la producción de equipos y maquinarias, pasando por el vestuario y 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.

Será 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 pretende 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)

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1. 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, entre las que se puede mencionar principalmente, 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.

Bajo 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.

3.2. 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

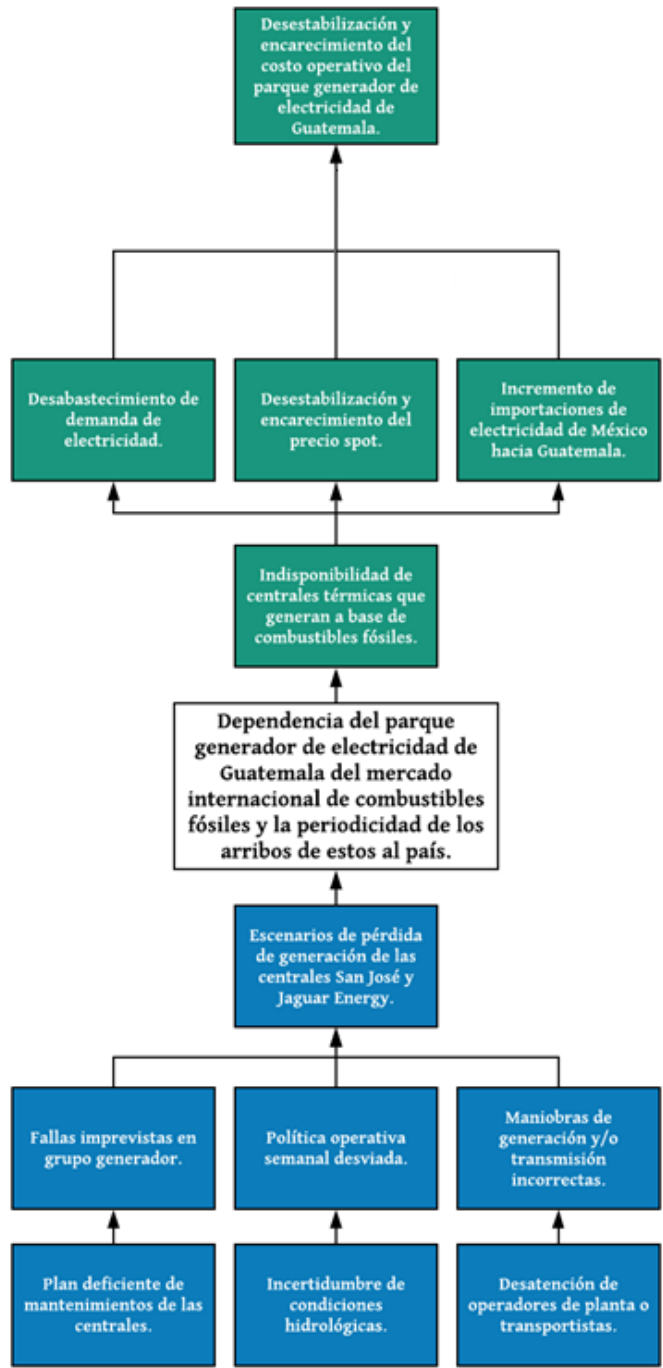
imprevista de ambas centrales, la dependencia del resto de centrales térmicas del mercado internacional de combustibles fósiles y la periodicidad de arribos de estos al país, puedan provocar déficit de recursos energéticos para cumplir con el abastecimiento de electricidad de Guatemala y las posibles 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, son riesgos latentes que podrían llegar a 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 a estudiar:

Figura 1. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia.

3.3. Formulación del problema

Lo anteriormente descrito da 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 requiere la interrogante principal contempla 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?

3.4. Delimitación del problema

A continuación, se presenta la delimitación contextual, geográfica e histórica del problema de investigación en estudio.

3.4.1. Delimitación contextual

El estudio de seguridad energética propuesto se contextualiza 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 o indirectamente en el cumplimiento del abastecimiento de electricidad en el país, sin embargo, el contexto a analizar involucra principalmente a cuatro variables del parque generador de electricidad: precio *spot*, costo operativo, transacciones internacionales y demanda.

3.4.2. Delimitación geográfica

El estudio propuesto se realizará con base a 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 fundamenta en Guatemala y en el comportamiento de su parque generador de electricidad con países vecinos.

3.4.3. Delimitación histórica

Se realizará delimitación histórica a decisión del investigador, ya que el estudio propuesto será el primero en realizarse en Guatemala, por lo que el muestreo no probabilístico que se utilizará será la herramienta para realizar la delimitación histórica de la temática a tratar, tomando como base el comportamiento del parque generador de Guatemala en los últimos dos años.

4. JUSTIFICACIÓN

A continuación, se presenta el siguiente protocolo de tesis de la maestría en gestión de mercados eléctricos regulados, que corresponde a la línea de investigación impactos de los sistemas de generación, transmisión, comercialización y distribución eléctrica, enfocado específicamente en un estudio de seguridad energética del parque generador de electricidad de Guatemala.

La seguridad energética en Guatemala es una temática que prácticamente no ha sido tratada, lo que abre la posibilidad a realizar estudios para evaluar escenarios de déficit de recursos energéticos y así determinar y presentar las repercusiones e implicaciones en las que incurriría el parque generador de electricidad del país ante dichos escenarios; es por esta razón que el estudio de seguridad energética a realizar, presentará y evaluará 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.

El estudio de seguridad energética del parque generador de electricidad de Guatemala será de mucho enriquecimiento en variedad de aspectos, ya que como se mencionó, en la actualidad no se ha realizado algún estudio de esta

índole que podría contribuir al sector eléctrico del país de distintas maneras, como se ejemplifica a continuación:

- Incentivar propuestas normativas que contribuyan a mejorar la seguridad energética de Guatemala, por medio de la regulación del correcto y mínimo abastecimiento de combustibles fósiles de las centrales térmicas.
- Aumentar la conciencia energética en agentes y entes involucrados en la seguridad energética de Guatemala, presentando las repercusiones e implicaciones en las que incurriría el parque generador de electricidad del país ante escenarios de déficit energético.
- Brindar premisas que puedan contribuir a la aceptación y promoción de planes energéticos integrales, que sean considerados por los involucrados en garantizar el suministro de electricidad en Guatemala.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo 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.

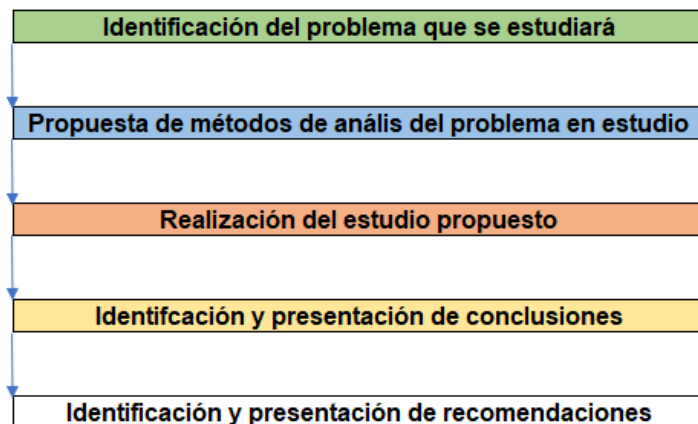
5.2. Objetivos específicos

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

6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

Con el estudio de seguridad energética que se propone, tal y como se mencionó en la justificación y planteamiento del problema del presente protocolo, se desea evidenciar el riesgo latente, sobre todo económico, de no contar con los recursos energéticos suficientes para abastecer de electricidad a los consumidores de Guatemala, lo cual tomó como base el siguiente esquema de solución:

Figura 2. **Esquema de solución**



Fuente: elaboración propia.

Como el estudio propuesto es de carácter exploratorio principalmente, primero se identificó el problema en estudio seguido de la propuesta de la metodología que se utilizará, lo cual fue realizado en los cursos de Seminario 1 y 2; los tres siguientes pasos del esquema de solución de la figura 2, se

realizarán en el momento que se lleve a cabo el estudio de seguridad energética del parque generador de electricidad de Guatemala, lo cual proporcionará las conclusiones y recomendaciones que se pretenden presentar para:

- Incentivar propuestas normativas que contribuyan a mejorar la seguridad energética de Guatemala, por medio de la regulación del correcto y mínimo abastecimiento de combustibles fósiles de las centrales térmicas.
- Aumentar la conciencia energética en agentes y entes involucrados en la seguridad energética de Guatemala, presentando las repercusiones e implicaciones en las que incurriría el parque generador de electricidad del país ante escenarios de déficit energético.
- Brindar premisas que puedan contribuir a la aceptación y promoción de planes energéticos integrales, que sean considerados por todos los involucrados en garantizar el suministro de electricidad en Guatemala.

7. MARCO TEÓRICO

La temática que se desea tratar en el estudio de seguridad energética del parque generador de electricidad de Guatemala, se podría encontrar dentro de muchos ámbitos que le conciernen al cumplimiento del abastecimiento de electricidad en el país, sin embargo, se desea abarcar aspectos fundamentales y específicos que podrán ser de mucha utilidad y esclarecimiento para la determinación y presentación de los resultados esperados, conclusiones y recomendaciones, no solo para el investigador, sino también para los lectores y para los interesados en el aseguramiento del suministro energético en Guatemala.

Se presentan cinco temáticas fundamentales para la introducción teórica del estudio propuesto, en las que no podría faltar la conceptualización de la seguridad energética a nivel general para su entendimiento y análisis, seguido de la presentación de los recursos energéticos no renovables que impactan directamente en el abastecimiento de electricidad del país; las siguientes dos temáticas consideran las características y modelación de los parques generadores de electricidad y lo asociado al abastecimiento de esta al mínimo costo posible. Finalmente, se presentan los conceptos asociados a indicadores económicos de electricidad, los cuales serán de gran importancia para la obtención de los resultados esperados del estudio propuesto.

7.1. 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 o pobres” (Rodríguez, 2018, p.25), por lo que se deben tomar en consideración conceptos de suma importancia para elaborar un estudio de seguridad energética, los cuales se presentan a continuación.

7.1.1. Concepto de seguridad energética

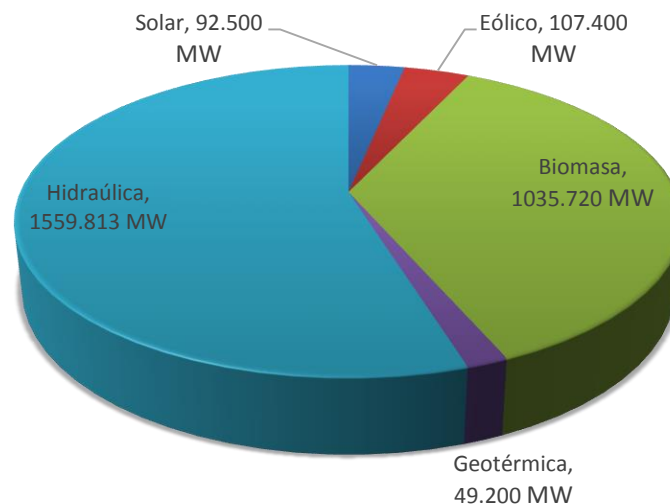
La Energy International Agency (citado por Rodríguez, 2018), mencionó que “la seguridad energética es la disponibilidad ininterrumpida de fuentes de energía a un precio asequible” (p.27), mientras que APERC (citado por Rodríguez, 2018), indica que “la seguridad energética es la capacidad de una economía 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), asegura que “la seguridad energética es simplemente la baja vulnerabilidad de los sistemas energéticos vitales” (p.27), como los de combustibles fósiles y la electricidad.

7.1.2. Diversidad 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 a base de combustible fósiles. Es por esta razón que Barredo (citado por Martínez, 2018), 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 a base de tecnologías renovables de generación de electricidad.

Figura 3. **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.

7.1.3. Seguridad energética en sistemas eléctricos

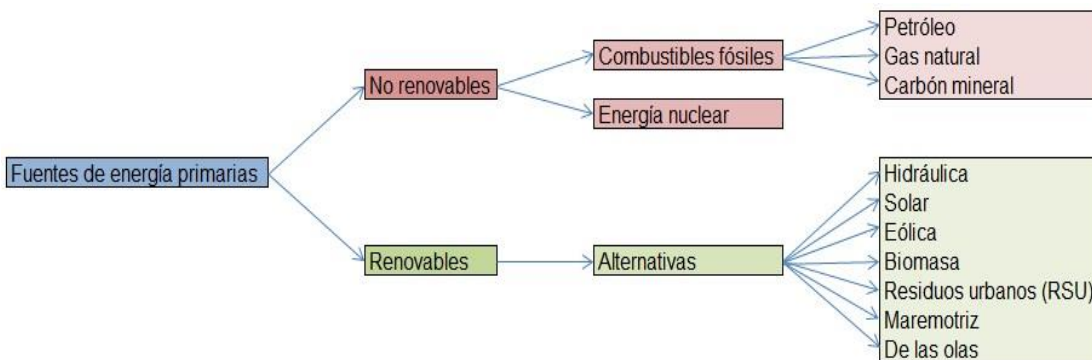
Según Rodríguez (2018), la seguridad energética en sistemas eléctricos “presenta claro oscuros: por una parte, se observa una elevada y creciente

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 mayor estabilidad, seguridad y confiabilidad en los sistemas eléctricos, como es el caso de Guatemala.

7.2. 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 4. **Clasificación de las fuentes de energía**



Fuente: elaboración propia, basado en UTE (2017). *Energías no renovables*.

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

- Renovables: son las fuentes de energía que no se agotan luego de que se transforma su energía 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” (Ferrari, 2013, p.7), porque los reservorios de estos recursos no pueden aumentar.

7.2.1. 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.10). 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 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
3	Canadá	171,000,000,000
4	Irán	157,800,000,000
5	Irak	144,200,000,000
6	Kuwait	104,000,000,000
7	Rusia	103,200,000,000
8	Emiratos Árabes	97,800,000,000
9	Libia	48,360,000,000

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

7.2.2. 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 ha contribuido a que en Guatemala se encuentren actualmente actividades exploratorias y de explotación de este recurso. El gas natural está ubicado en la actualidad como “la segunda fuente energética 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).

7.2.3. Carbón mineral

El primer combustible fósil utilizado por la humanidad fue el carbón mineral, el cual posee gran cantidad de reservas 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 a base de carbón mineral, como es el caso de San José y Jaguar Energy, que son las más grandes del país, con 439 MW de capacidad instalada total según información proporcionada por el Administrador del Mercado Mayorista, que utilizan dicho recurso energético.

Tabla II. **Clasificación del carbón mineral**

Tipo	Antracita	Hulla	Lignito	Turba
% 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, basado en UTE (2017). *Energías no renovables*.

7.3. Parques generadores de electricidad

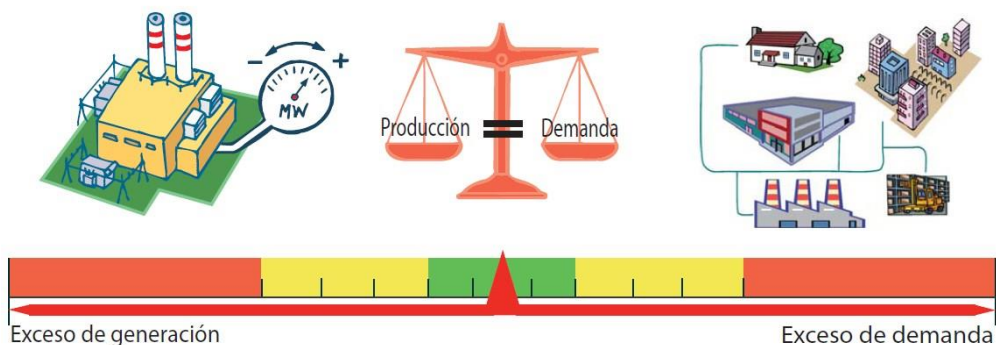
Los parques generadores de electricidad tienen como razón de ser el hecho de generar de electricidad para abastecer la demanda de esta. En la actualidad es muy común que en muchos países los parques generadores de

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 diferentes tipos de tecnología,
- Importaciones de electricidad provenientes de países vecinos, y
- La demanda de electricidad que debe abastecerse.

Figura 5. **Equilibrio generación – demanda**



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

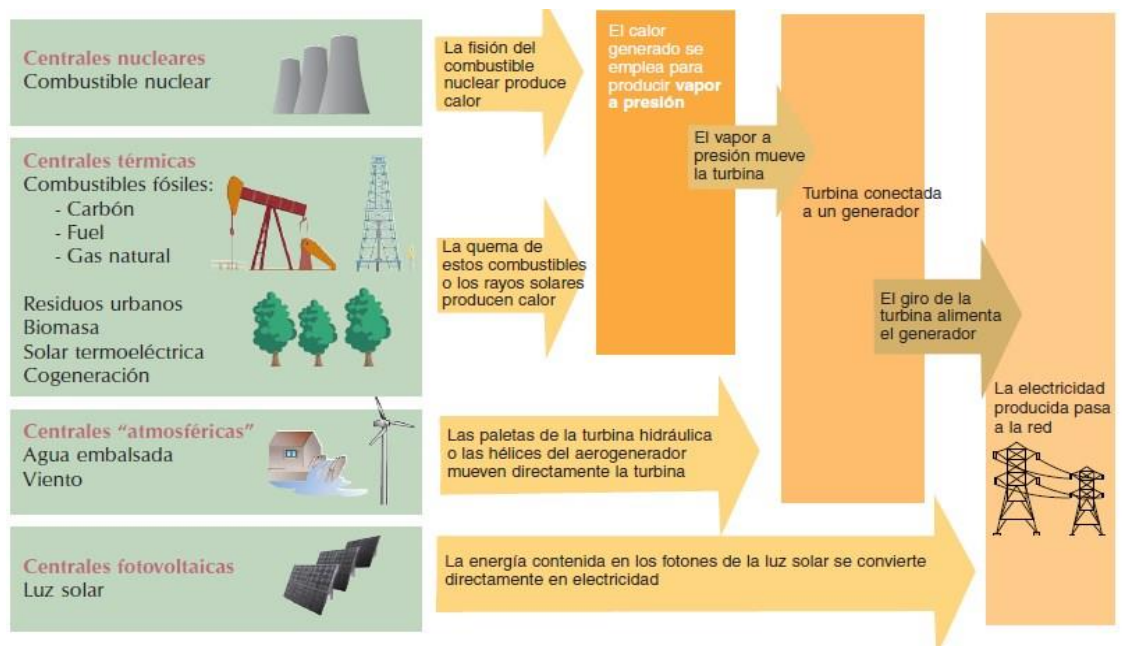
7.3.1. **Tecnologías de producción de electricidad**

La electricidad, según Red Eléctrica de España (2009), puede definirse 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 se dice que la electricidad es una fuente de energía secundaria.

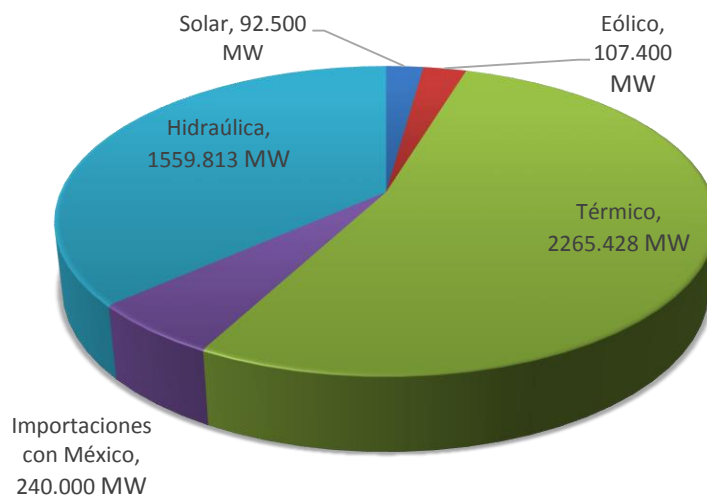
Figura 6. **¿Cómo se produce electricidad?**



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), que como bien se sabe, convierte la energía mecánica producida por la turbina en electricidad.

Figura 7. **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.

7.3.2. 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**

Interconexión	País de enlace
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.

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).

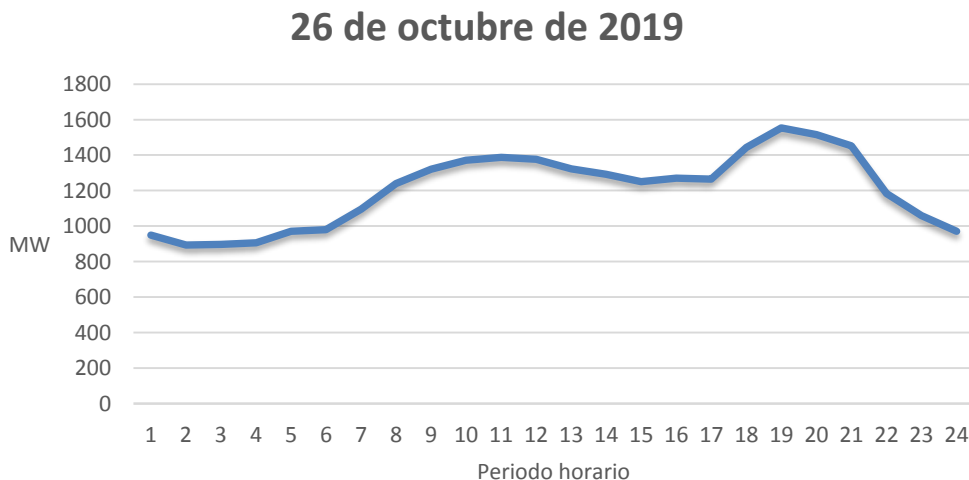
El Administrador del Mercado Mayorista (2002), en términos nacionales, define a la importación de electricidad como la “actividad por medio de la cual el Mercado Mayorista de Guatemala recibe o compra de otro país Energía

Eléctrica producida con unidades o Centrales generadoras instaladas en un país diferente a Guatemala” (p.3); dicha actividad se considera como generación adicional al mercado mayorista en Guatemala en el nodo correspondiente.

7.3.3. 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 8. **Curva de demanda nacional proyectada de Guatemala**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Administrador del Mercado Mayorista.

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

7.4. Despacho económico de electricidad

(Leal, 2005) parte de la planificación de corto plazo para conceptualizar las características de un despacho económico de electricidad, el cual es el encargado de determinar la programación horaria, económica y confiable de cada una de las unidades 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.

7.4.1. 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 son los recursos energéticos de las diferentes tecnologías de generación de electricidad que se utilizan para abastecer la demanda de esta.

La herramienta Nuevo Corto Plazo (NCP), que se presentará más adelante, utiliza fundamentalmente programación lineal para realizar los despachos de electricidad, tomando en consideración los escenarios que se deseen analizar. Para el caso del estudio propuesto, los insumos a ingresar al NCP que serán optimizados por medio de programación lineal, serán los utilizados para escenarios óptimos y también los asociados a condiciones de déficit energético que serán seleccionados partiendo de los últimos dos años de historia del parque generador de electricidad de Guatemala.

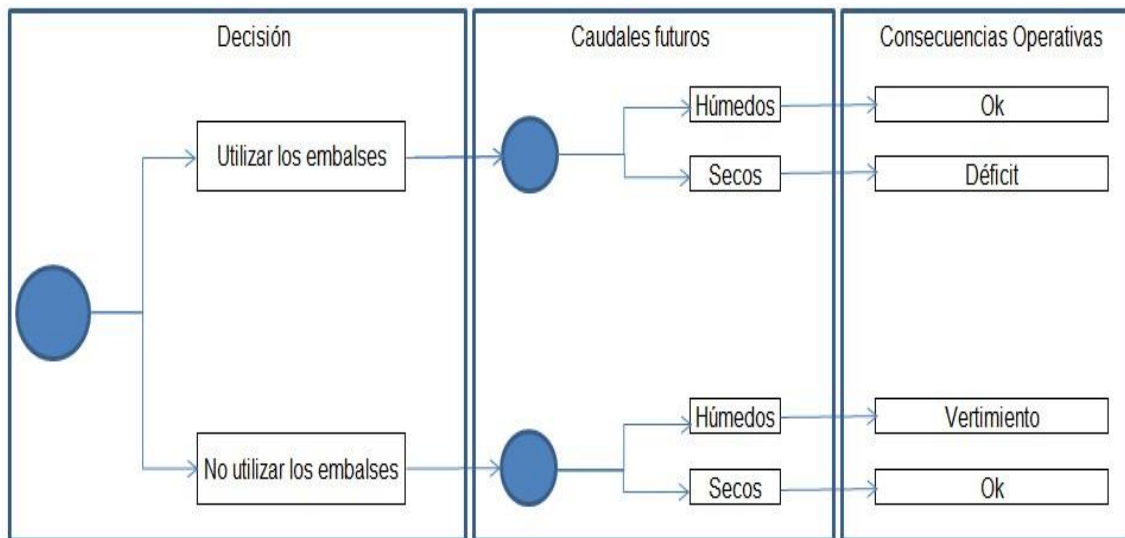
7.4.2. Función objetivo

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 puede 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 utilizará el NCP para realizar despachos de electricidad, debe de poseer una función a optimizarse, ya sea para maximizar o minimizar ingresos o costos respectivamente. Para el caso del estudio propuesto, los despachos que se realizarán con el NCP optimizarán los recursos energéticos para cada escenario, lo cual involucra minimizar el costo en el que incurriría el parque generador de electricidad para abastecer la demanda nacional de electricidad y las exportaciones. Dicho lo anterior, el NCP

utilizará programación lineal para optimizar los recursos energéticos insumos para cada despacho, lo que dará como resultado el costo operativo de dichos despachos, para lo cual se utilizará la función objetivo.

Figura 9. **Proceso de decisión para sistemas hidrotérmicos**



Fuente: elaboración propia, basado en 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.*

7.4.3. Herramienta Nuevo Corto Plazo

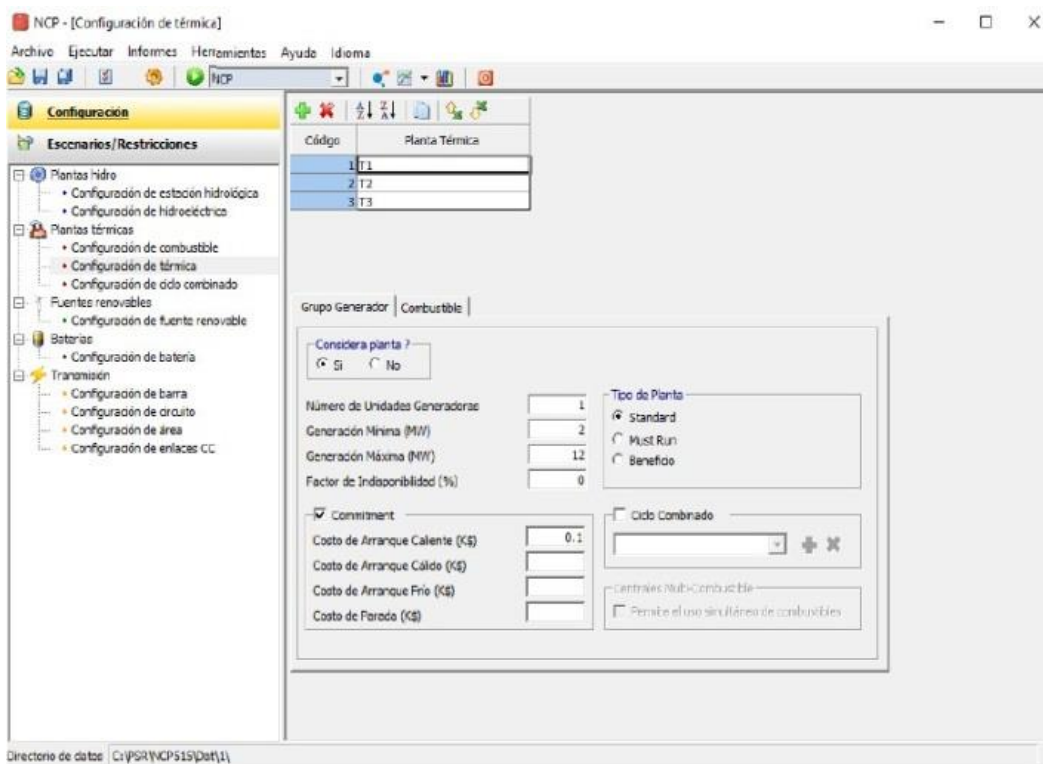
PSR en su Manual de Usuario, describe al Nuevo Corto Plazo o NCP como:

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 hidroeléctricas y termoeléctricas,

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 Administrador del Mercado Mayorista para realizar las programaciones de despachos de electricidad de carácter mensual, semanal y diario, así como las reprogramaciones que pudieran requerirse. Dicha herramienta es muy amigable, por lo que será de gran utilidad en la realización del estudio propuesto, además del conocimiento del investigador para el uso del NCP, lo cual en conjunto permitirá obtener resultados confiables y lo más verídicos posibles.

Figura 10. Interfaz gráfica del Nuevo Corto Plazo



Fuente: elaboración propia.

7.5. Indicadores económicos de electricidad

Existe diversidad de indicadores económicos concernientes a la electricidad, ya sean de producción, demanda o valorización de esta, 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.

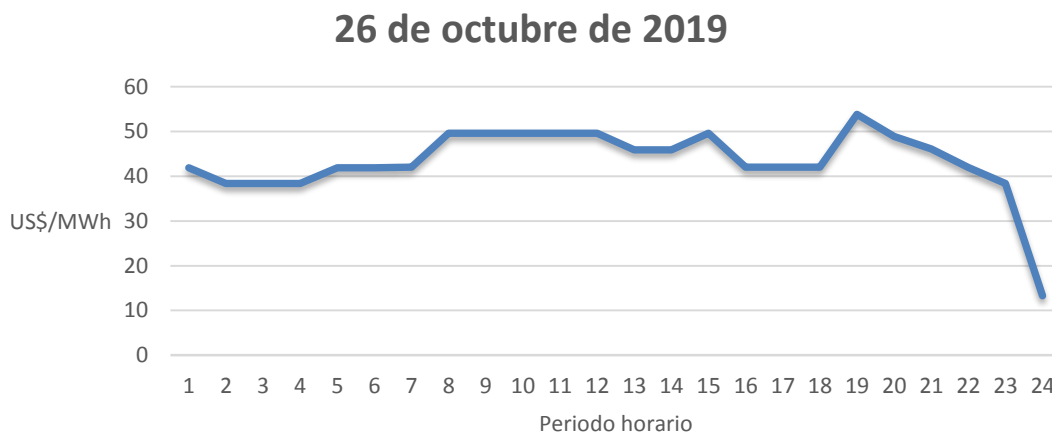
7.5.1. Precio *spot*

Según la Norma de Coordinación Comercial no. 4, en su Artículo 1, el precio *spot*, Precio de Oportunidad de la Energía 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 Norma de Coordinación Comercial no. 4 y en la no. 1 se detalla la metodología de cálculo del precio *spot* en Guatemala, lo cual será de utilidad para automatizar el proceso para la determinación de dicho precio. Es importante mencionar que el investigador posee el conocimiento necesario para verificar el comportamiento del precio *spot* ante escenarios óptimos o de déficit energético, por lo que se podrán obtener resultados confiables y lo más verídicos posibles.

Figura 11. **Comportamiento del precio *spot* proyectado en Guatemala**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Administrador del Mercado Mayorista.

7.5.2. **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 costo variable de generación 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 la presentación de la conceptualización de los costos variables de generación 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.

7.5.3. Costo operativo

Para lograr entender e interpretar el significado de costo operativo, se debe de partir 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 es el que optimizará el NCP a través de las simulaciones de despacho de electricidad que se realizarán, para lo cual se puede 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 propuesto, déficit de recursos energéticos en Guatemala.

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

Resumen de costos operativos según programa de despacho diario
Costo Operativo Unidades hidroeléctricas
Costo Operativo Unidades eólicas
Costo Operativo Unidades térmicas
Costo Operativo por Reserva Rodante Operativa
Costo Operativo del S.N.I. sin RRa
Costo Operativo por Reserva Rápida
Costo Operativo del S.N.I. con RRa

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Administrador del Mercado Mayorista.

8. ÍNDICE PROPUESTO DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ÍNDICE DE TABLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTENIMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

- 1.1. Antecedentes de estudios de seguridad energética en Guatemala
- 1.2. Conceptos de asociados a seguridad energética
- 1.3. Seguridad energética
 - 1.3.1. Concepto de seguridad energética
 - 1.3.2. Diversificación energética
 - 1.3.3. Seguridad energética en sistemas eléctricos
- 1.4. Recursos energéticos no renovables
 - 1.4.1. Petróleo
 - 1.4.2. Gas natural
 - 1.4.3. Carbón mineral
- 1.5. Parques generadores de electricidad
 - 1.5.1. Tecnologías de producción de electricidad
 - 1.5.2. Importaciones de electricidad

- 1.5.3. Demanda de electricidad
 - 1.6. Despacho económico de electricidad
 - 1.6.1. Programación lineal
 - 1.6.2. Función objetivo
 - 1.6.3. Herramienta Nuevo Corto Plazo
 - 1.7. Indicadores económicos de electricidad
 - 1.7.1. Precio *spot*
 - 1.7.2. Costos variables de generación
 - 1.7.3. Costo operativo
 - 2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN
 - 2.1. Obtención de resultados
 - 2.2. Determinación de escenarios a estudiar
 - 2.3. Obtención de insumos para simulaciones
 - 2.4. Simulaciones de despacho de electricidad
 - 2.5. Comparaciones entre resultados obtenidos y datos programados y reales
 - 3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS
 - 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS
- CONCLUSIONES
- RECOMENDACIONES
- BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS
- ANEXOS

9. METODOLOGÍA

9.1. Características del estudio

A continuación, se detallan los elementos metodológicos que se considerarán en el estudio de seguridad energética.

9.1.1. Diseño

El diseño que se adoptará será cuasiexperimental, pues en el estudio de seguridad energética que se realizará, se pretenden manipular variables concretas, de las cuales algunas serán independientes y otras serán dependientes, es decir, no se poseerá el control total sobre las variables que se estudiarán, debido a que las características propias del parque generador de electricidad de Guatemala serán las variables independientes y las repercusiones que tendrá dicho parque generador ante escenarios de pérdida de generación de las centrales San José y Jaguar Energy serán las variables dependientes.

9.1.2. Enfoque

El enfoque del estudio propuesto serán cuantitativo, ya que este se basará en el análisis de la seguridad energética del parque generador de electricidad de Guatemala, para lo que se utilizarán diferentes procedimientos basados en la medición de las repercusiones que tendría dicho parque generador ante escenarios ante escenarios de pérdida de generación de las centrales San José

y Jaguar Energy; es por esta razón que el estudio propuesto también será de causalidad, ya que se analizarán las relaciones causales entre los escenarios de déficit energético a evaluar y las repercusiones que tendría el parque generador de electricidad de Guatemala ante dichos escenarios.

9.1.3. Alcance

El alcance del estudio a realizar es exploratorio, dado que este se centrará en analizar aspectos concretos de la realidad de la seguridad energética del parque generador de electricidad de Guatemala, que no han sido analizados aún a profundidad, lo cual permitirá que investigaciones posteriores puedan dirigirse a un análisis de la temática a tratarse 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.

9.1.4. Unidad de análisis

La unidad de análisis en estudio será el parque generador de electricidad de Guatemala, el cual puede dividirse principalmente en tres elementos:

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

Se extraerán muestras de forma intencional, las cuales serán estudiadas en su totalidad.

9.2. Variables

Las variables que se estudiarán se describen a continuación:

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

Variable	Definición teórica	Definición operativa
Demanda de electricidad [MWh/día]	Electricidad demandada o requerida en Guatemala por consumidores a nivel nacional y a nivel de exportaciones.	Se obtendrá por medio de proyecciones y resultados reales de demanda de electricidad emitidas por el AMM.
Precio <i>spot</i> [US\$/MWh]	Costo marginal de corto plazo de la electricidad en Guatemala en cada hora.	Se obtendrá por medio de proyecciones y resultados reales de precio <i>spot</i> emitidas por el AMM, además de cálculos propios con base a la NCC-04.
Costo operativo [US\$/día]	Costo total de la operación del parque generador de electricidad de Guatemala.	Se obtendrá 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 obtendrá por medio de proyecciones y resultados reales de importaciones de electricidad emitidas por el AMM.

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Clasificación de las variables**

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

Fuente: elaboración propia.

9.3. Fases del estudio

Se presentan las fases en las que se realizará el estudio de seguridad energética.

9.3.1. Fase 1

En esta fase se realizará la búsqueda, revisión y consulta de fuentes bibliográficas relacionadas con la temática a tratar, como artículos científicos, normas, libros e informes a nivel nacional e internacional, los cuales serán el fundamento para la realización del primero estudio de seguridad energética del parque generador de electricidad de Guatemala.

9.3.2. Fase 2

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

Las herramientas por utilizar durante esta fase del estudio serán Microsoft Excel para calcular el precio *spot* y el NCP para realizar las simulaciones de despacho del parque generador de electricidad de Guatemala, herramienta que utilizará programación lineal para optimizar los diferentes recursos energéticos que se utilizarán como insumos para abastecer la demanda de electricidad a nivel nacional y exportaciones.

Las consecuencias por determinar se obtendrán realizando comparaciones entre el precio *spot* que se estableció en tiempo real durante los días analizados, datos que serán obtenidos de postdespachos emitidos por el Administrador del Mercado Mayorista, y el precio *spot* calculado con base a las simulaciones de despacho para los mismos días de análisis, para los cuales se tomarán en consideración los escenarios de pérdida de generación de las centrales San José y Jaguar Energy.

Las comparaciones entre los datos reales y los datos simulados se realizarán haciendo uso de Microsoft Excel, para mostrar numérica y gráficamente las repercusiones que tendría el precio *spot* ante escenarios de déficit energético en el parque generador de electricidad de Guatemala.

9.3.3. Fase 3

Determinar las afectaciones que tendría el costo operativo del parque generador de electricidad de Guatemala, debido a la indisponibilidad de diferentes bloques de generación, se logrará simulando despachos de generación en condiciones de déficit energético de los días por analizar y calculando el costo operativo de dichos despachos, datos que serán comparados con el costo operativo de los mismos días en condiciones normales de operación.

Las herramientas que se utilizarán en esta fase del estudio, será la función objetivo que proporcionará el NCP para determinar 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. Los datos en condiciones normales de operación serán obtenidos de

programaciones de despacho realizadas por el Administrador del Mercado Mayorista, y los datos en condiciones de déficit energético se obtendrán de las simulaciones de despacho que realizarán para el estudio propuesto.

9.3.4. Fase 4

Las importaciones de electricidad provenientes de México serán modeladas y optimizadas por medio del NCP, por otro lado, aunque sería factible técnica y comercialmente importar electricidad proveniente del Sistema Eléctrico Regional, dicha electricidad no será considerada en el estudio propuesto, ya que su incidencia en el abastecimiento de demanda de electricidad del país sería prácticamente insignificante, lo cual se decidió con base a los datos históricos de importaciones de electricidad de Guatemala.

Los cambios en las transacciones internacionales de electricidad, que se pretenden determinar debido a los diferentes escenarios de déficit energético en el parque generador de electricidad de Guatemala, serán los resultantes de las importaciones de electricidad provenientes de México y las exportaciones de electricidad que se analizarán en la siguiente fase del estudio, resultados que serán comparados con transacciones internacionales de electricidad en condiciones normales de operación.

Las herramientas que se utilizarán en esta fase del estudio será el NCP para optimizar las importaciones y exportaciones de electricidad y Microsoft Excel para presentar los resultados obtenidos numérica y gráficamente. Los datos por comparar referentes a los escenarios de déficit energético serán obtenidos de simulaciones de despacho de generación y los datos en condiciones normales de operación se obtendrán programaciones de despacho emitidas por el Administrador del Mercado Mayorista.

9.3.5. Fase 5

Determinar la cantidad de demanda de electricidad desabastecida debido a la indisponibilidad de centrales térmicas que generan a base de combustibles fósiles, se logrará simulando despachos tomando en consideración escenarios de pérdida de generación de las centrales San José y Jaguar Energy, y considerando las declaraciones de abastecimientos de combustibles de las centrales térmicas del parque generador de electricidad de Guatemala, las cuales estarán sujetas al comportamiento del mercado internacional de combustibles fósiles.

El NCP optimizará los recursos energéticos disponibles, los cuales a tal punto no serían los suficientes para abastecer la demanda de electricidad del parque generador del país; los resultados que se obtendrán serán comparados con las condiciones reales de los días por analizar, para obtener datos de electricidad no suministrada y por ende las repercusiones económicas que involucrará dicho desabastecimiento. Se utilizará Microsoft Excel para analizar y presentar los resultados obtenidos de manera numérica y gráfica.

Los datos en condiciones de déficit energético serán obtenidos de las simulaciones de despacho realizadas haciendo uso del NCP y los datos reales serán considerados de postdespachos emitidos por el Administrador del Mercado Mayorista. Es importante mencionar que el muestreo por utilizar en todas las fases del estudio propuesto será del tipo intencional para seleccionar los lapsos de días que se analizarán.

9.4. Resultados esperados

Con base en las preguntas de investigación, los objetivos y las diferentes fases de estudio del trabajo de graduación que se realizará, se esperan obtener los siguientes resultados en las diferentes variables que estarán en estudio:

1. Repercusiones negativas en el parque generador de electricidad de Guatemala.
2. Desestabilización y encarecimiento del precio *spot*.
3. Desestabilización y encarecimiento del costo operativo del parque generador de electricidad de Guatemala.
4. Incremento de importaciones de electricidad de México hacia Guatemala y desabastecimiento de demanda de electricidad de exportación.
5. Desabastecimiento de demanda de electricidad.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

A continuación, se indicará el tipo de muestreo que se utilizará para la obtención de la información por analizar, el cual involucrará principalmente los insumos para la realización de las simulaciones de despacho de generación de electricidad del parque generador de Guatemala, además de los datos reales o simulados con los que se compararán los resultados obtenidos, para lo cual también se presentará el tipo de análisis que se empleará para realizar dichas comparaciones.

10.1. Muestreo no probabilístico

Este tipo de muestreo es una técnica que permitirá al investigador realizar la selección de muestras basándose en un criterio subjetivo y no en un criterio basado en selección aleatoria. Debido a que el estudio por realizar posee un alcance exploratorio, este tipo de muestreo se adaptará de excelente manera a los requerimientos del investigador, ya que es una técnica menos estricta y que depende en gran medida de la experiencia del investigador en el área de estudio correspondiente.

La técnica de muestreo no probabilístico presentará la ventaja de que la obtención de la información será más rápida, ya que el investigador conocerá la muestra. Para el caso del estudio de seguridad energética que se realizará, las muestras por obtener se fundamentarán en las siguientes variables:

- Precio *spot*

- Costo operativo
- Importaciones y exportaciones de electricidad
- Demanda de electricidad
- Declaraciones de existencias de combustibles fósiles
- Recursos energéticos en general

Las muestras serán obtenidas de programaciones y resultados de operación emitidos por el Administrador del Mercado Mayorista, la cual es información de carácter público. Únicamente los datos de declaraciones de existencias de combustibles fósiles serán utilizados con permiso de dicha entidad, que es en la que labora el investigador.

El criterio con el cual se realizará la selección de las respectivas muestras estará sujeto a la estacionalidad del comportamiento de las variables involucradas; dicha estacionalidad dependerá principalmente de condiciones climáticas y eventos relevantes en el parque generador de electricidad de Guatemala. El criterio de selección será establecido en su totalidad por el investigador, ya que se pretende analizar escenarios críticos que podrán ser de mucha utilidad para evidenciar la relevancia justificable del estudio por realizar.

10.2. Análisis univariado

El análisis de cada una de las variables por estudiar será de tipo univariado, ya que estas serán estudiadas por separado y para todos los casos su nivel de medición será de razón. Se hace la salvedad que, para el caso de la tercera y cuarta pregunta auxiliar de investigación, la variable demanda de electricidad de exportación, será tratada y estudiada para obtener respuestas a

ambas preguntas, pero por ser la misma variable, su análisis continuará siendo univariado.

10.3. Análisis aritmético y estadístico

Las comparaciones por realizar entre los resultados obtenidos y los datos programados o reales, para responder a las preguntas de investigación, se realizarán por medio de operaciones algebraicas, sumas, restas, multiplicaciones y divisiones, además del empleo de estadística descriptiva, más específicamente, se hará uso de medias aritméticas:

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

Donde:

- \bar{x} : media aritmética
- n : suma de valores de la variable en estudio
- x_i : i-ésima variable en estudio

Los resultados que se obtendrán, los datos programados y reales, además de las comparaciones correspondientes, también serán analizados(as) gráficamente haciendo uso de Microsoft Excel, herramienta con la que también se realizarán las operaciones aritméticas y de estadística descriptiva a emplear.

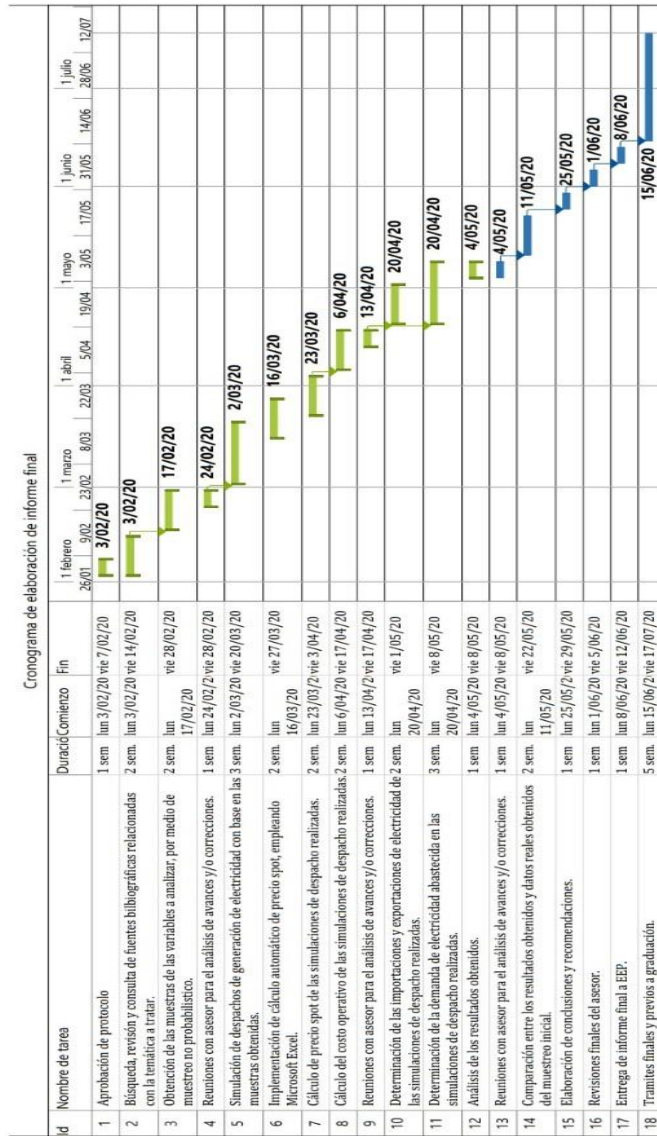
10.4. Simulaciones y despachos de electricidad

Los despachos de electricidad que se simularán se realizarán partiendo de la ecuación $F = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_jx_j$, la cual corresponde a la función objetivo que utilizará el NCP para optimizar los insumos energéticos que se seleccionarán por muestreo no probabilístico, como se mencionó anteriormente.

Es importante mencionar que, las simulaciones de despachos de electricidad proporcionarán datos que serán el fundamento para responder a las preguntas de investigación del estudio de seguridad energética propuesto, principalmente la pregunta auxiliar número dos, número tres y número cuatro, ya que la pregunta auxiliar número uno requerirá un método adicional para poder ser contestada, con base en las normas de coordinación comercial correspondientes (1 y 4), que corresponden a la metodología del cálculo del precio *spot* en Guatemala.

11. CRONOGRAMA

Figura 12. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia.

12. FACTIBILIDAD TÉCNICA Y FINANCIERA

Se considera que el estudio propuesto es totalmente factible de realizar, ya que todos los recursos necesarios para su realización serán proporcionados por la entidad en la que labora el investigador, Administrador del Mercado Mayorista, la cual permitirá el uso del equipo detallado en la tabla VII, además de los permisos concernientes a la realización del trabajo de graduación.

Tabla VII. **Recursos necesarios**

Recurso	Disponibilidad del recurso	Fuente de financiamiento	Cuantificación
Humano	Investigador, asesor y coasesor	No aplica	3 personas
Financiero	Gastos de impresiones	Investigador	Q1,500.00
Tecnológico	Herramienta NCP, paquete de Office 365 e internet	AMM	1 herramienta NCP, 1 paquete de Office 365 y el internet necesario
Acceso a información	Información pública	No aplica	La necesaria
Permisos	Para utilizar la herramienta NCP y declaraciones de los agentes del Mercado Mayorista de Guatemala	AMM	Los necesarios
Equipo	Computadora de escritorio	AMM	1 computadora de escritorio
Infraestructura	Oficina	AMM	1 oficina y elementos involucrados
Imprevistos/otros	Se consideran imprevistos/otros de cualquier índole	Investigador	Q75.00

Fuente: elaboración propia.

12.1. Valorización de recursos proporcionados por el Administrador del Mercado Mayorista

A continuación, se detalla el valor económico de los recursos proporcionados por el Administrador del Mercado Mayorista, lo cual no representará un costo para el investigador o un costo extra para la entidad:

Tabla VIII. Recursos proporcionados por el AMM

Recurso	Costo aproximado
Licencia del NCP	Q123,200.00
Llave del NCP	Q15,400.00
Licencia de Office 365 (mensual)	Q100.00
Computadora de escritorio	Q7,000.00
Total	Q145,700.00

Fuente: elaboración propia.

El único costo económico que tendrá la realización del informe final será el de las impresiones necesarias para la presentación física de dicho informe. También se consideró el 5 % de los costos totales ante cualquier imprevisto.

13. REFERENCIAS

1. Administrador del Mercado Mayorista. (2000). *Norma de coordinación comercial No. 4 precio de oportunidad de la energía. Resolución 157-02*. Guatemala, Guatemala, Guatemala: Administrador del Mercado Mayorista.
2. Administrador del Mercado Mayorista. (2002). *Norma de coordinación comercial No. 10 exportación e importación de energía eléctrica. Resolución No. 300-01*. Guatemala, Guatemala, Guatemala: Administrador del Mercado Mayorista.
3. 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*. Nicaragua: Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.
4. Escribano, G. (2014). *La seguridad energética española en un escenario en transición*. España: Cuadernos de Estrategia.
5. 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*. Guatemala, Guatemala, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.

6. Leal, E. (2005). *Despacho económico de carga considerando restricciones en la red de transporte con el uso de técnicas de programación lineal*. Guatemala, Guatemala, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
7. Martínez, V. (2017). *La diversificación energética en Colombia desde la política pública*. 41-41. Buenos Aires, Argentina: Publicaciones de Facultad de Filosofía y Letras.
8. Molina, J., Martínez, V. y Rudnick, H. (2005). *Indicadores de Seguridad Energética: Aplicación al Sector Energético de Chile*. Santiago: Pontificia Universidad Católica de Chile.
9. PSR. (2019). *Modelo NCP. Manual de usuario*. Brasil: PSR.
10. Red Eléctrica de España. (2009). *El suministro de electricidad*. España: Domènech e-learning multimedia, S.A.
11. Rodriguez, V. (2018). *Seguridad energética Análisis y evaluación del caso de México*. México: Publicación de las Naciones Unidas.
12. Ruiz, A. (2007). *La seguridad energética de América Latina y el Caribe en el contexto mundial*. Santiago de Chile: División de Recursos Naturales e Infraestructura CEPAL.
13. Saavedra, R. (2016). *Transacciones internacionales de electricidad en Colombia. Impactos a la demanda interna. Documentos FCE-CID Escuela de Economía*. Bogotá: Centro Editorial FCE-CID.

14. Sontay, D. (2011). *Optimización del despacho hidrotérmico estocástico del SNI para un estudio de largo plazo*. Guatemala, Guatemala, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
15. UTE. (2017). *Energías no renovables*. Uruguay: Divulgación Escolar.

