



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA  
PARA LA INTEGRACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA GENERADA A PARTIR DE GAS  
NATURAL COMO ALTERNATIVA AL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE  
GUATEMALA**

**Ludwig Israel Sandoval González**

Asesorado por el Ma. Ing. Josué Miguel Ramírez Lemus

Guatemala, marzo de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA  
PARA LA INTEGRACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA GENERADA A PARTIR DE GAS  
NATURAL COMO ALTERNATIVA AL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE  
GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**LUDWIG ISRAEL SANDOVAL GONZÁLEZ**  
ASESORADO POR EL MA. ING. JOSUÉ MIGUEL RAMÍREZ LEMUS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, MARZO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

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

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Francisco Javier González López
EXAMINADOR	Ing. Saúl Cabezas Durán
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA  
PARA LA INTEGRACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA GENERADA A PARTIR DE GAS  
NATURAL COMO ALTERNATIVA AL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE  
GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 30 de octubre de 2020.



**Ludwig Israel Sandoval González**

Ref. EEPFI-1616-2020  
Guatemala, 28 de noviembre de 2020

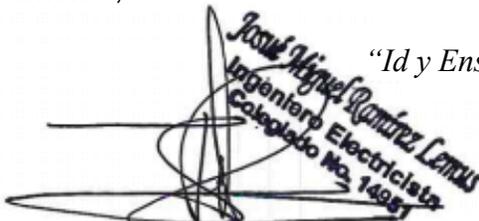
Director  
Armando Alonso Rivera Carrillo  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Presente.

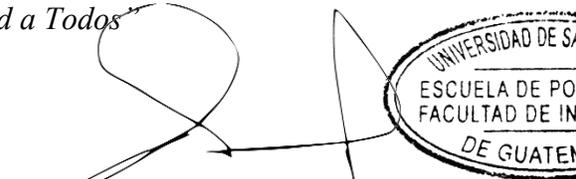
Estimado Ing. Rivera:

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA LA INTEGRACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA GENERADA A PARTIR DE GAS NATURAL COMO ALTERNATIVA AL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante **Ludwig Israel Sandoval González** carné número **201212486**, 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 Energía y Ambiente.

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.

Atentamente,

  
"Id y Enseñad a Todos"  
Ingeniero Electricista  
Colegiado No. 14957  
Mtro. Josué Miguel Ramírez Lemus  
Asesor

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

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





EEP-EIME-036-2020

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 FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA LA INTEGRACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA GENERADA A PARTIR DE GAS NATURAL COMO ALTERNATIVA AL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario Ludwig Israel Sandoval González, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo  
Director

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica



Guatemala, noviembre de 2020

LNG.DECANATO.OI.272.2023

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 DEL ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA LA INTEGRACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA GENERADA A PARTIR DE GAS NATURAL COMO ALTERNATIVA AL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE GUATEMALA**, presentado por: **Ludwig Israel Sandoval González**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Córdoba Estrada

Decana



Guatemala, marzo de 2023

AACE/gaoc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Mi madre</b>	Por haberme guiado y apoyado durante mi vida, sin ella no hubiera podido alcanzar esta meta.
<b>Mi familia</b>	Por su apoyo durante mi vida.
<b>Mis amigos</b>	Por su compañía y apoyo en esta etapa.
<b>En memoria de</b>	Rodolfo Gonzalez Contreras (q. e. p. d.).

## AGRADECIMIENTOS A:

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser el <i>alma mater</i> que me permitió nutrirme de conocimientos.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por proporcionarme los conocimientos que me han permitido culminar esta etapa.
<b>Mi asesor</b>	Ma. Ing. Josué Miguel Ramírez Lemus por haberme guiado durante el trabajo de graduación.
<b>Mi familia</b>	Por su apoyo brindado durante esta etapa.
<b>Mis amigos</b>	Quienes siempre me motivaron a seguir adelante.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES .....	5
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	11
4. JUSTIFICACIÓN .....	15
5. OBJETIVOS .....	17
5.1. General.....	17
5.2. Específicos .....	17
6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	19
7. MARCO TEÓRICO.....	21
7.1. Gas natural.....	21
7.1.1. Definición .....	21
7.1.2. Origen.....	21
7.1.3. Composición.....	22
7.1.4. Tipos.....	24

7.1.4.1.	Por su lugar de proveniencia.....	24
7.1.4.1.1.	Gas asociado .....	24
7.1.4.1.2.	Gas no asociado o libre .....	25
7.1.4.1.3.	Gas de condensación retrógrada.....	25
7.1.4.2.	Por su lugar de proveniencia.....	25
7.1.4.2.1.	Gas húmedo.....	25
7.1.4.2.2.	Gas seco .....	26
7.1.4.3.	Por su almacenamiento.....	26
7.1.4.3.1.	Gas natural comprimido.....	26
7.1.4.3.2.	Gas natural licuado .....	26
7.2.	Generación eléctrica a partir de gas natural.....	26
7.2.1.	Principios.....	27
7.2.2.	Tipo de gas natural utilizado.....	27
7.2.3.	Tipos de centrales generadoras .....	27
7.2.3.1.	Centrales termoeléctricas de ciclo convencional .....	27
7.2.3.2.	Centrales termoeléctricas de ciclo combinado.....	28
7.3.	Sistema Nacional Interconectado.....	29
7.3.1.	Definición.....	29
7.3.2.	Potencia instalada .....	29
7.3.3.	Generación mensual y anual.....	31
7.3.4.	Participación de energía renovable y no renovable.....	32
7.3.5.	Legislación para la participación de nuevas fuentes de energía .....	34

	7.3.5.1.	Ministerio de Energía y Minas.....	34
7.4.		Modelo de simulación .....	40
	7.4.1.	Bases.....	41
	7.4.2.	Parámetros .....	41
	7.4.3.	Plataforma de simulación SimSEE .....	41
8.		PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	43
9.		METODOLOGÍA.....	47
	9.1.	Tipo de estudio .....	47
	9.2.	Definición de variables.....	47
	9.3.	Fases del estudio .....	48
	9.3.1.	Fase 1: Exploración bibliográfica .....	48
	9.3.2.	Fase 2: Recolección y compilación de datos .....	48
	9.3.2.1.	Centrales generadoras de energía eléctrica a partir de carbón, búnker y diésel instaladas en el país y su capacidad de contribución en el SIN ...	49
	9.3.2.2.	Fuentes de gas natural que permitan sustituir alguna fracción de la energía eléctrica generada a partir de otros combustibles fósiles.....	50
	9.3.2.3.	Porcentaje de emisión de gases de efecto invernadero que producen la generación a partir de combustibles fósiles y a partir de gas natural.....	51
	9.3.2.4.	Tipos de contratos de generación a partir de gas natural que sean viables en Guatemala .....	51

9.3.3.	Fase 3: Análisis de datos obtenidos.....	52
9.3.3.1.	Gráficas de la operación futura que tendría el sistema incorporando el gas natural como fuente de generación alternativa, distintos tipos de pronósticos, como generación a partir de energías renovables, demanda eléctrica, precios futuros de tecnologías y combustibles .....	52
9.3.4.	Fase 4: Reporte de análisis económico .....	54
9.3.4.1.	Información detallada de volúmenes de energía y dinero intercambiados de cada participante con el mercado, la rentabilidad de proyectos específicos y cálculos de precios y riesgos para el diseño de contratos.....	55
9.3.5.	Fase 5: Presentación y discusión de resultados .....	56
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS.....	59
11.	CRONOGRAMA .....	61
12.	RECURSOS NECESARIOS Y FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO.....	63
13.	REFERENCIAS .....	65
14.	APÉNDICES .....	69

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Capacidad Instalada del parque generador del SNI en MW, año 2017 .....	30
2.	Capacidad Instalada del parque generador del SNI por tipo de propiedad, año 2017 .....	30
3.	Generación Eléctrica por tipo de combustible en (%), durante el año 2017 .....	31
4.	Generación mensual vrs demanda de energía eléctrica en GWh .....	31
5.	Matriz de Generación Eléctrica por tipo de recurso .....	32
6.	Matriz de Generación Eléctrica por tipo de recurso (anual) .....	32
7.	Costo Variable de Generación promedio por tipo de recurso en US\$/MWh.....	33
8.	Promedio mensual del Precio de Oportunidad de la Energía –POE- o Precio Spot en US\$/MWh .....	33
9.	Generación Eléctrica por tipo de combustible en (%), durante el año 2017 .....	49
10.	Pronóstico de generación incorporando fuentes renovables.....	53
11.	Proyección del costo de generación a partir de combustibles fósiles .....	54
12.	Proyección de volúmenes de energía intercambiados a largo plazo en el mercado eléctrico .....	55
13.	Proyección del costo marginal promedio anual.....	56

## TABLAS

I.	Tipos de tecnologías de generación de energía eléctrica con gas natural.....	28
II.	Definición de variables.....	47
III.	Generación anual por tipo de combustible.....	50
IV.	Fuentes de gas natural que permitan sustituir la generación a partir de combustibles fósiles.....	50
V.	Porcentaje de emisiones de GEI por centrales generadoras a partir de combustibles fósiles y gas natural .....	51
VI.	Tipos de contratos de generación a partir de gas natural .....	52
VII.	Comparación de factibilidad técnica y económica de proyectos de generación a partir de fuentes de energía limpia .....	57
VIII.	Cronograma de actividades .....	61
IX.	Recursos necesarios para el estudio .....	63

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>C<sub>4</sub>H<sub>10</sub></b>	Butano
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>\$</b>	Dólar estadounidense
<b>US\$/MWh</b>	Dólar estadounidense por mega vatio hora
<b>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></b>	Etano
<b>GW</b>	Giga vatio
<b>GWh</b>	Giga vatio hora
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>h</b>	Horas
<b>kW</b>	Kilo vatio
<b>kWh</b>	Kilo vatio hora
<b>MW</b>	Mega vatio
<b>MWh</b>	Mega vatio hora
<b>CH<sub>4</sub></b>	Metano
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cúbico
<b>CO</b>	Monóxido de carbono
<b>N<sub>2</sub></b>	Nitrógeno
<b>ft<sup>3</sup></b>	Pie cúbico
<b>%</b>	Porcentaje
<b>P</b>	Potencia eléctrica
<b>C<sub>3</sub>H<sub>8</sub></b>	Propano
<b>Q</b>	Quetzales
<b>btu/ft<sup>3</sup></b>	Unidad térmica británica por pie cúbico

**CO<sub>2</sub>eq**

Unidades de dióxido de carbono equivalente

## GLOSARIO

<b>Energía eléctrica</b>	Forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos cuando se los pone en contacto por medio de un conductor eléctrico.
<b>Gas natural</b>	Hidrocarburo mezcla de gases ligeros de origen natural.
<b>Combustible fósil</b>	Proviene de la descomposición natural de la materia orgánica (plantas, microorganismos, bacterias y algas) luego de un proceso de transformación que puede durar más de 600 millones de años.
<b>Matriz energética</b>	Representación cuantitativa de la totalidad de energía que utiliza un país, e indica la incidencia relativa de las fuentes de las que procede cada tipo de energía.
<b>SNI</b>	Sistema Nacional Interconectado.
<b>MEM</b>	Ministerio de Energía y Minas.
<b>AMM</b>	Administrador del Mercado Mayorista.

<b>Potencia instalada</b>	Capacidad de energía que puede generar y entregar una central eléctrica en condiciones ideales.
<b>Mercado eléctrico</b>	Sistema para efectuar las compras, a través de ofertas de compra, ventas, a través de ofertas de venta y operaciones a corto plazo, generalmente en forma de permutas financieras o swap de obligación.
<b>Energía renovable</b>	Proceden de recursos naturales y reducen la contaminación, siendo capaces de regenerarse a través de medios naturales.
<b>Energía no renovable</b>	Se encuentran en cantidades limitadas y proceden de combustibles fósiles o nucleares, produciendo el consecuente impacto ambiental negativo.
<b>GEI</b>	Gases de efecto invernadero.
<b>Hidrocarburos</b>	Compuestos orgánicos conformados únicamente por átomos de carbono e hidrógeno.
<b>Petróleo</b>	Mezcla de compuestos orgánicos, principalmente hidrocarburos insolubles en agua. Se produce en el interior de la Tierra, por transformación de la materia orgánica acumulada en sedimentos del pasado geológico.

<b>Punto de ebullición</b>	Temperatura a la cual la presión de vapor del líquido es igual a la presión que rodea al líquido y se transforma en vapor.
<b>Comburente</b>	Sustancia que logra la combustión, o en su defecto, contribuye a su aceleración.
<b>Combustión</b>	Reacción química que se produce entre el oxígeno y un material oxidable, que va acompañada de desprendimiento de energía y habitualmente se manifiesta por incandescencia o llama.
<b>Densidad relativa</b>	Comparación de la densidad de una sustancia con la densidad de otra que se toma como referencia.
<b>Energía térmica</b>	Es la parte de la energía interna de un sistema termodinámico en equilibrio que es proporcional a su temperatura absoluta y se incrementa o disminuye por transferencia de energía.
<b>Gasóleo</b>	También denominado como diésel es un hidrocarburo que se consigue mediante un proceso de destilación del petróleo.
<b>POE</b>	Precio de Oportunidad de la Energía.
<b>DPI</b>	Documento Personal de Identificación.
<b>CNEE</b>	Comisión Nacional de Energía Eléctrica.

<b>SimSEE</b>	Simulador de Sistemas de Energía Eléctrica.
<b>Carbón</b>	Roca sedimentaria organógena de color negro, rica en carbono y con otros elementos, principalmente hidrógeno, azufre, oxígeno y nitrógeno. Principalmente es utilizada como combustible fósil.
<b>Búnker</b>	Es una fracción del petróleo que se obtiene como residuo en la destilación fraccionada.
<b>Energía limpia</b>	Forma de obtención de energía que durante su proceso de extracción y generación produce un mínimo o nulo impacto ecológico en el medio ambiente.
<b>Costo marginal</b>	Es el incremento del coste total resultante de la producción de una unidad adicional del bien.
<b>INDE</b>	Instituto Nacional de Electrificación.
<b>IVA</b>	Impuesto al Valor Agregado.

## RESUMEN

La generación de energía eléctrica de fuentes limpias se ha convertido en los últimos años en un tema de gran importancia, ya que nos permite reducir la dependencia de energía a base de petróleo y evitar contaminar el medio ambiente.

El gas natural es una mezcla de gases entre los que se encuentra en mayor cantidad el metano. La proporción en la que se encuentra este compuesto es del 75% al 95% del volumen total de la mezcla. El resto de los componentes son etano, propano, butano, nitrógeno, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, helio y argón. El desarrollo del empleo del gas natural se ha realizado con posterioridad al uso del petróleo.

El gas natural que aparecía en casi todos los yacimientos petrolíferos se quemaba como un residuo más. A pesar de su enorme poder calorífico no se podía aprovechar, por los grandes problemas que planteaban su almacenamiento y transporte.

La necesidad de encontrar nuevas fuentes de energía, la puesta a punto de las técnicas de licuefacción de gas y procedimientos de soldadura de tuberías para resistir grandes presiones, han hecho posible la utilización de todos estos recursos energéticos. En la actualidad Europa es abastecida por una red de gasoductos que recorren miles de kilómetros y están en proyecto otros nuevos con Asia y Argelia.

Este estudio de factibilidad técnica y económica pretende mostrar el impacto que tendría la integración de energía eléctrica generada a partir de gas natural como alternativa al sistema nacional interconectado de Guatemala. Impacto tanto en los aspectos energético y ambiental.

# 1. INTRODUCCIÓN

La integración de la generación de energía eléctrica a partir de gas natural en la matriz energética como alternativa a la utilización de combustibles fósiles es una de las opciones que varios países en el mundo han decidido implementar para reducir los niveles de contaminación actuales. Lamentablemente la falta de un estudio actualizado que presente el gas natural como una alternativa viable para Guatemala produce la dependencia de la generación a partir de otras fuentes que dañan el medio ambiente para satisfacer la creciente demanda energética del país.

La simulación de un modelo que analice la integración de la generación de energía eléctrica a partir de gas natural como alternativa para el Sistema Nacional Interconectado, sentará las bases para la elaboración de un estudio de factibilidad técnica y económica actualizado y detallado del impacto que tendría la implementación de esta fuente de generación de energía limpia en el país.

El estudio de factibilidad técnica y económica presentará una evaluación de la viabilidad de la implementación de proyectos que involucren el uso de gas natural como fuente de generación en Guatemala. Brindará la información y datos necesarios para establecer un criterio objetivo acerca de las ventajas y desventajas de la generación de energía eléctrica a partir de gas natural y la inclusión de la misma en el Sistema Nacional Interconectado del país.

Para la realización del estudio el método que se utilizará se dividirá en 5 fases. Se iniciará con la primera fase en la que se llevará a cabo la exploración bibliográfica del tema. Posteriormente se realizará la recolección y compilación

de datos relevantes para la realización del estudio. Se continuará con el análisis de los datos obtenidos y el posterior ingreso de los mismos en la plataforma de simulación. Esto proporcionará gráficas y datos de la operación futura que tendría el SNI con la integración del gas natural como alternativa a los combustibles fósiles.

De la información obtenida de las fases anteriores se procede a realizar un análisis de proyección de proyectos que involucren fuentes de generación de energía limpia. Finalmente, al tener toda la información y datos procesados se proseguirá con la realización del estudio de factibilidad técnica y económica de la integración de la generación de energía eléctrica a partir de gas natural como alternativa al Sistema Nacional Interconectado del país. Los recursos necesarios para la realización del estudio serán proporcionados por el estudiante. La cantidad aportada cubrirá los costos de los mismos lo cual permitirá que sea factible la realización del estudio.

En el capítulo 1 se hará una revisión bibliográfica de antecedentes que existan de la aplicación de la generación de energía eléctrica a partir de gas natural en el mundo. En el capítulo 2 se realizará la investigación bibliográfica sobre la base teórica del gas natural, la generación eléctrica a partir del mismo, el sistema nacional interconectado, la potencia instalada y generación anual. Asimismo, de la legislación para la participación de nuevas fuentes de energía, así como las bases, los parámetros y la plataforma de simulación en la que se realizará el modelo. En el capítulo 3 se hará la recolección y compilación de datos de estudios, reportes e investigaciones que traten de los aspectos técnicos y económicos de la generación de energía eléctrica a partir de gas natural.

En el capítulo 4 se procede a ingresar a la plataforma de simulación la información necesaria para determinar las bases y establecer los parámetros a

utilizar para la realización del modelo que se propondrá. En el capítulo 5 se procede a realizar un análisis de proyección a largo plazo de la interacción del mercado eléctrico y costos de proyectos que involucren fuentes de energías limpias. En el capítulo 6 se presentará un estudio de la factibilidad técnica y económica de proyectos de generación de energía eléctrica a partir de gas natural en Guatemala. En el capítulo 7 se realizará la discusión de los resultados obtenidos del estudio de factibilidad técnica y económica realizado. Finalmente se presentarán las conclusiones y recomendaciones del estudio para la continuidad de mismo.



## 2. ANTECEDENTES

En Guatemala no se encontraron investigaciones o estudios al respecto de la integración del mercado de gas natural al mercado eléctrico, por lo que se presentaran estudios realizados en otros países del mundo como referencias del tema, en distintos mercados eléctricos de Latinoamérica.

En la publicación *Estudio comparativo de modelos de mercados eléctricos en países de América Latina*, Diaz, Gomez, Silva y Noriega (2017) analizan los modelos de mercados eléctricos en América Latina. Muestra un análisis cuantitativo de las características de mercados eléctricos durante un largo periodo de tiempo en países de América Latina con el fin de identificar posibles alternativas que sean viables y permitan contribuir a retos importantes para lograr un mercado integrado. Manejan la metodología usada en el proceso investigativo, principiando por reconocer experiencias afines a la integración de mercados eléctricos en América Latina, plantean diferencias en los mercados eléctricos para iniciar la creación de un mercado integrado. Concluyen que estos mercados son de naturaleza diversa y que en relación a todo esto, hay perspectivas que son bastante positivas con muy buenos proyectos de expansión en marcha, a pesar de algunos conflictos macroeconómicos que enfrentan ciertos gobiernos. Sin embargo, los regímenes de mercado a largo plazo adoptados por los países latinoamericanos, son diferencias que ofrecen un reto, si se proyecta a futuro una integración completa de los mercados nacionales.

En el artículo *Trayectoria tecnológica de los mercados eléctricos en Centroamérica*, Vargas-Alfaro (2015) presentan una caracterización de las formas institucionales del mercado eléctrico de Centroamérica para tres modelos

de país: Guatemala, El Salvador y Costa Rica. Para ello ejecutan un análisis de los esquemas regulatorios del sector eléctrico que existen en la región con el propósito de exponer la influencia que la trayectoria tecnológica tiene sobre estos modelos. Llevan a cabo el análisis de lo anterior ya que tiene importancia, no solo por el patrón de dependencia y concentración tecnológica de los países en relación a fuentes de energía (electricidad y combustibles) establecidas en combustibles fósiles, sino también por el efecto y la vulnerabilidad que en materia de cambio climático tiene la alta concentración y la dependencia de tecnologías de generación eléctrica y de transporte basadas en dichos combustibles. Evidencian el desvío hacia fuentes de electricidad basadas en combustibles fósiles en los países que apostaron por reformas de mercado con alicientes de corto plazo. Concluyeron que existe un claro patrón de cambio tecnológico que está reciamente unido al patrón de evolución institucional, donde se destaca que la diversificación de la matriz eléctrica, el ingreso de nuevas fuentes, procesos de ahorro y uso inteligente de la energía son fijadas por la evolución institucional y por las condiciones de constancia al cambio, asociadas a las diferentes realidades nacionales de Centroamérica.

En la tesis doctoral titulada *Análisis de mercados eléctricos interconectados con restricciones de red*, Fernández (2015) plantea que, tras la liberalización del sector eléctrico y la creación de mercados nacionales, ha tomado cada vez más importancia la integración de estos mercados eléctricos en mercados regionales. La capacidad de interconexión entre estos mercados frecuentemente es limitada y es usual que ocurran congestiones. Los dos mecanismos para manejar estas congestiones que más se han debatido son las subastas implícitas y las explícitas. Analiza además de los dos anteriores, un mecanismo de gestión de congestiones híbrido, con características intermedias entre las subastas implícitas y explícitas. En la integración de los mercados, el diseño elegido para gestionar las congestiones afecta al comportamiento estratégico de los agentes.

Una forma habitual de representar la lógica de los agentes es mediante supuestos de respuesta del precio. Considera dos tipos de racionalidad por parte de los generadores: Una en la que mediante su conjetura los generadores anticipan completamente el efecto de sus acciones en el precio de la energía y otra en la que solo anticipan de forma parcial este efecto mediante sus conjeturas, por lo que precisan completarla por otros medios. Concluye que las conjeturas de respuesta del precio son función del estado de la red. Como consecuencia, el problema de la representación del comportamiento estratégico presenta discontinuidades cuando la red cambia de estado.

En el artículo *Análisis Comparativo de Diferentes Esquemas de Suficiencia en Generación Eléctrica: Algunas Reflexiones Para el Mercado Eléctrico en Colombia*, Estrada, Duque y Rendón (2016) presentan una referencia internacional de diferentes tipos de diseño de mercados eléctricos enfocado principalmente a los mecanismos utilizados para garantizar la suficiencia en capacidad de generación, describen la problemática actual y hacen algunas recomendaciones para el mercado colombiano con base en las ventajas, desventajas y adaptabilidad evidenciadas en los mercados analizados de organizaciones como Nord Pool, PJM y países como Chile, Brasil y Panamá. Concluyen que el análisis realizado se identificó la importancia de la credibilidad del esquema de mercado y la estabilidad normativa e institucional, tanto desde la perspectiva del Estado como de los agentes participantes, para garantizar la suficiencia en capacidad de generación en el mediano y largo plazo así como el desempeño eficiente del mercado eléctrico.

En el trabajo de licenciatura *Análisis del mercado eléctrico: desde generación hasta comercialización*, Colás (2016) analiza el sector eléctrico. El análisis incluye una detallada descripción de los principales agentes que interactúan en el sector (generación, transporte, distribución y comercialización),

las principales características competitivas del mercado y los principales determinantes del precio de la electricidad. No es un mercado competitivo basado únicamente en la oferta y la demanda, sino que hay otros factores que deben tenerse en cuenta, como las externalidades en la generación de electricidad y los monopolios naturales en el transporte y la distribución. Concluye que el mercado eléctrico presenta un elevado grado de complejidad, donde interactúan muchos agentes y donde la información en la mayoría de ocasiones no es certera, lo que provoca la existencia de muchas dificultades e intereses de los agentes que intervienen en él. No se trata de un mercado habitual en el que únicamente interactúan la oferta y la demanda, este mercado va más allá y hay otros factores que deben tenerse en cuenta, como las externalidades en la generación de electricidad y los monopolios naturales en el transporte y la distribución. Determina que hay más condicionantes e incertidumbre y conceptos que no dejan de ser del todo claros para la sociedad.

En el artículo *Integración de fuentes no convencionales de energía renovable dentro del mercado eléctrico mayorista*, Bohórquez y Durán-Tovar (2018) exploran el estado de integración de las fuentes no convencionales de energía renovable al sistema eléctrico colombiano, concretamente al mercado eléctrico mayorista, con el fin de modelar el mercado con estas fuentes de energía emergentes. Concluyen que en varios de los países incluidos en este documento se puede observar el crecimiento de la participación de este tipo de energías en la matriz energética del país, reduciendo así la generación de energía eléctrica a partir de fuentes fósiles. Aunque encontraron que en varios países las centrales de fuentes no convencionales de energía renovable pueden comercializar la energía producida en el mercado spot, por las diferencias con respecto a la regulación, se pudo observar que en los casos de mayor éxito de aumento de la generación con este tipo de tecnologías la energía producida se

comercializa a través de contratos (regulados y no regulados) a mediano y largo plazo.



### **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Actualmente en Guatemala se cuenta con algunos modelos que simulan el impacto que tendría la energía eléctrica a partir de gas natural en el Sistema Nacional Interconectado pero son muy generales o no están actualizados. Es poca la información de estudios o trabajos de investigación que aborden el tema de la generación de energía eléctrica a partir de gas natural como una alternativa para la diversificación de la matriz energética o como una opción para sustituir la generación a partir de carbón.

Guatemala se ha interesado principalmente en estudiar e implementar proyectos de generación a partir de fuentes renovables como el aire y el sol, dejando de lado al gas natural que a pesar de no ser considerada una fuente renovable es una fuente de generación de energía limpia. La falta de inversión y el desinterés en estudiar la generación de energía eléctrica a partir de gas natural llevan a la creencia de que proyectos que propongan este tipo de generación como una alternativa para el SNI son inviables en el país.

El desconocimiento y el hecho de que en Guatemala no se tiene ese recurso, aunque puede importarse desde otros países es otra de las razones del desinterés en este tema. Algunas causas de la falta de información es el poco interés de la industria energética en invertir en este tipo de combustible como fuente de generación de energía eléctrica, el desconocimiento y la falta de este recurso en el país. Esto, debido a que el capital de inversión está dirigido mayormente a fuentes de generación renovable. Un factor determinante en la decisión de la industria energética de no invertir en el gas natural y no

considerarla una alternativa para la generación en Guatemala, es el poco interés en conocer a detalle este tipo de generación.

Lo anterior lleva a que no se aproveche del gas natural; un combustible energético considerado como el que menor cantidad de gases contaminantes emite al ambiente. El desaprovechamiento de este combustible priva de la posibilidad de integrar y fortalecer la matriz energética del país, asimismo contribuye al deterioro de la calidad del aire debido a que se sigue utilizando carbón como una de las principales fuentes de generación.

Todo esto provoca que se tenga que completar la matriz energética con otros combustibles fósiles más contaminantes y menos económicos, como el carbón, el búnker o el diésel, para poder cubrir la demanda que presenta el país. Esta dependencia conlleva una alta producción de partículas y sustancias nocivas para el ambiente, asimismo una alta emisión de gases de efecto invernadero, los cuales contribuyen al calentamiento global, provocando fuertes cambios climáticos, desastres naturales y el deterioro progresivo del medio ambiente.

Al depender del carbón como una de las principales fuentes de generación de energía eléctrica del país, al no buscar alternativas para sustituir este combustible por uno más amigable con el ambiente y considerando el aumento creciente de la demanda del país, existe el riesgo de un posible aumento del uso del carbón como fuente de generación de energía eléctrica, provocando el aumento de la emisión de gases de efecto invernadero.

Esto lleva a plantear la pregunta principal de este estudio: ¿Es factible técnica y económicamente la integración de energía eléctrica generada a partir

de gas natural como alternativa al sistema nacional interconectado de Guatemala?

Para responder a esta interrogante se deberán contestar las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Cuánta energía es aportada por centrales generadoras a partir de carbón, búnker o diésel al SNI de Guatemala?
- ¿Existen fuentes de gas natural que permitan sustituir alguna fracción de la energía eléctrica generada con base en otros combustibles fósiles?
- ¿Cuál es el impacto ambiental que tendría la sustitución de centrales generadoras a partir de carbón, búnker o diésel por centrales generadoras a partir de gas natural en el SNI?
- ¿Cuál es el impacto económico y la rentabilidad que tendrían proyectos que integren la generación de energía eléctrica a partir de gas natural como alternativa al SNI?



## 4. JUSTIFICACIÓN

La realización de la presente investigación se justifica en la línea de investigación de gestión y uso eficiente de la energía del área de gestión energética de la Maestría en Energía y Ambiente.

Satisfacer la creciente demanda de energía eléctrica, afrontando al mismo tiempo el cambio climático y la contaminación, es uno de los principales desafíos al que se enfrenta la sociedad. Como fuente de energía el gas natural es considerado el combustible energético con menor cantidad de gases contaminantes, al momento de su extracción y transporte no contamina lo cual contribuye a proporcionar energía más limpia. Se optó por simular la integración de esta fuente de energía como alternativa al SNI por su ayuda a reducir el dióxido de carbono y a mejorar la calidad del aire cuando sustituye al carbón.

Este trabajo de investigación presentará un análisis que permitirá obtener un pronóstico del impacto que tendría la incorporación de energía eléctrica generada a partir de gas natural como alternativa al sistema nacional interconectado. Se presentará un análisis de la información obtenida de la simulación, el cual determinará los volúmenes de energía que sustituiría el gas natural, el impacto ambiental que tendría esta sustitución, así como la rentabilidad de proyectos específicos y riesgos para el diseño de los mismos.

La investigación proporcionará información que aporte a la industria energética bases para determinar la viabilidad de la ejecución de proyectos de generación a partir de gas natural. Asimismo, dejará un precedente para futuros

trabajos que involucren la integración de una fuente de energía que aún no sea integrada al sistema nacional interconectado.

El estudio beneficia a la industria energética ya que presenta una opción que aporta a la diversificación de la matriz energética. Asimismo, impacta al medio ambiente dado que la utilización de gas natural como sustituto de fuentes de generación que producen una alta concentración de gases invernadero y sustancias nocivas, reduciría considerablemente la emisión de las mismas.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. General**

Determinar la factibilidad técnica y económica de la integración de energía eléctrica generada a partir de gas natural como alternativa al Sistema Nacional Interconectado de Guatemala.

### **5.2. Específicos**

- Definir cuanta energía es aportada por centrales generadoras a partir de carbón, búnker o diésel al SNI de Guatemala.
- Determinar las fuentes de gas natural que permitan sustituir alguna fracción de la energía eléctrica generada con base en otros combustibles fósiles.
- Estimar el impacto ambiental que tendría la sustitución de centrales generadoras a partir de carbón, búnker o diésel por centrales generadoras a partir de gas natural en el SNI.
- Establecer el impacto económico y la rentabilidad que tendrían proyectos que integren la generación de energía eléctrica a partir de gas natural como alternativa al SNI.



## **6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN**

La inexistencia de un estudio del impacto que tendría la integración de energía eléctrica a partir de gas natural como alternativa en el Sistema Nacional Interconectado tiene efectos perjudiciales tanto para la industria energética como para el ambiente. Por esto se propone un modelo de simulación que permita obtener un pronóstico del aporte energético y ambiental de la integración del gas natural como fuente de generación, en sustitución del carbón. Para esto se analizarán las características del gas natural y del Sistema Nacional Interconectado, así como las leyes que involucran los lineamientos de la integración de una fuente de generación nueva a la matriz energética.

Entre las principales causas de la inexistencia de un modelo de la generación a partir de gas natural como alternativa para el SNI están la falta de interés de la industria energética en esta fuente como generadora de energía eléctrica y la falta de inversión en esta tecnología. Esto lleva a la creencia de que proyectos de este tipo de fuente de generación son inviables en el país. Este estudio proporcionará información relevante para considerar el gas natural como alternativa viable en Guatemala, conociendo los volúmenes de energía que sustituiría el gas natural, el impacto ambiental que tendría esta sustitución, así como la rentabilidad de proyectos específicos y riesgos para el diseño de los mismos.

Se realizará un modelo de simulación a través del software SimSEE, el cual ayudará a determinar la viabilidad del gas natural como combustible alternativo al carbón, proporcionará información para determinar el impacto que tendría en el ambiente la sustitución del carbón por gas natural en el SNI y contribuirá con

conocimiento desarrollado que aportará bases para el análisis de proyectos de generación a partir de gas natural. Esto presentará una solución para la dependencia a la generación a partir de carbón que tiene el país y llevará al aprovechamiento de un combustible energético con menor cantidad de emisiones de gases contaminantes.

Los resultados obtenidos de este estudio serán de beneficio para la industria energética, brindando una opción para la diversificación de la matriz energética, asimismo para futuros investigadores que busquen analizar la integración de una fuente de energía nueva al Sistema Nacional Interconectado y su impacto en el ambiente.

## **7. MARCO TEÓRICO**

### **7.1. Gas natural**

A continuación se da una breve descripción y definición de lo que es el gas natural.

#### **7.1.1. Definición**

El gas natural es un combustible fósil que tiene moléculas muy dispersas entre sí y con gran velocidad a ciertas condiciones de presión y temperatura, razón por la cual no presenta un volumen definido dado que su separación es tan grande que la fuerza de atracción entre ellas es muy débil. Se comprimen simplemente al aumentar la presión y presentan densidades bastantes bajas (Brucart, 1982).

El gas natural es un conjunto de hidrocarburos gaseosos formados primordialmente por el metano, con una proporción mayor al 70 %, que se consigue de la naturaleza en los campos petrolíferos junto al crudo del petróleo (gas natural asociado) o acompañado solamente por mínimas cantidades de otros hidrocarburos o gases (gas natural no asociado) (Brucart, 1982).

#### **7.1.2. Origen**

El origen del gas natural se produce de los métodos de descomposición de la materia orgánica que se establecieron desde hace millones de años atrás, de la misma forma que el petróleo o el carbón.

Estos depósitos de materia orgánica se produjeron gracias a los organismos planctónicos que se fueron reservando en el fondo marino de plataformas costeras o en las cuencas poco profundas de estanques y que a través de los años con los procesos de meteorización quedaron enterradas bajo capas de tierra (Pérez y Martínez, 1995).

Debido a los ambientes de presión y temperatura estos compuestos orgánicos se descompusieron gradualmente, por la falta de oxígeno y por la acción bacteriana.

Al generarse esta descomposición se formaron gases, por los cambios de presión y por sus bajas densidades incrementaban a través de las rocas porosas de la corteza terrestre hasta cruzarse con formaciones permeables, las cuales suscitaron un atrapamiento en dichas rocas, estas facilitaron el origen de lo que actualmente se conoce como yacimientos de petróleo y gas. Se conoce visiblemente cómo se crearon, pero no se sabe sencillamente con seguridad en qué determinados lugares se encuentran, debido a esto es que es objeto de estudio para geólogos y geofísicos determinar donde existen estos yacimientos (Pino, 2010).

### **7.1.3. Composición**

El gas natural es un hidrocarburo esencialmente constituido por el metano ( $\text{CH}_4$ ), con una pequeña proporción de otros hidrocarburos saturados como etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) y butano ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ); también es posible la presencia de gases inertes como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y el nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) (Amell, Agudelo y Cadavid, 2002).

Habitualmente, se encuentra en una proporción del 85%, mezclado con un 10% de etano, un 3% de propano, un 0,1% de butano y un 0,7% de nitrógeno. Todos tienen un punto de ebullición muy bajo, de hasta  $-158,9^{\circ}\text{C}$  en el caso del metano (Pérez y Martínez, 1995).

Mientras que a temperaturas ordinarias los hidrocarburos con 5-10 átomos de carbono son líquidos, estos hidrocarburos de menor peso molecular (menos de 5 carbonos) se presentan en forma de gas o vapor. Para extraer la energía contenida en los enlaces químicos C-H se debe producir el proceso de combustión) (Pérez y Martínez, 1995).

La combustión es una reacción de oxidación (exotérmica) de un cuerpo combustible (gas) con otro cuerpo oxidante (aire), denominado comburente (Prieto, 2013).

Esta transformación va acompañada de desprendimiento de calor, y el fenómeno acostumbra a ser perceptible por la presencia de una llama que constituye una fuente de luz y calor. Para tener lugar la combustión es necesario que el combustible y el comburente estén en contacto, con las proporciones adecuadas, y que la temperatura de la mezcla sea superior a su temperatura de ignición (Prieto, 2013).

La densidad relativa del gas natural, tomando el aire como referencia, es de 0,6 a 0,66, es decir, es menos denso o pesado que el aire (Pino, 2010).

El gas natural se caracteriza principalmente por su combustión limpia, debido a que cuando se lo combina con el aire no produce cenizas ni óxido de carbono ni otros contaminantes que pueden afectar al medio ambiente al ser expuestos al aire, el momento de la combustión esta presenta una llama de color

azul muy característica, la cual permite indicar lo anteriormente dicho, ya que al observar una llama defectuosa se puede visualizar de otro color, lo cual indica que está emanando humos, monóxido de carbono (CO) y metano el cual es uno de los mayores causantes del efecto invernadero, es por ello que se debe tener mucho cuidado al combustionar compuestos para poder evitar impactos ambientales (Pérez y Martínez, 1995).

Se estima que las reservas mundiales son de más de 146 billones de metros cúbicos (146.000.000.000.000), los cuales, con el nivel actual de consumo, permitirían cubrir la demanda de más de 60 años. El descubrimiento de nuevos yacimientos y las nuevas técnicas de extracción, no obstante, pueden aumentar esta cifra (Pino, 2010).

#### **7.1.4. Tipos**

Existen varios tipos de gas natural, para poder clasificarlos, se ha tomado en cuenta su lugar de proveniencia, la composición y su almacenamiento, entre ellos tenemos:

##### **7.1.4.1. Por su lugar de proveniencia**

De acuerdo al lugar de donde se obtiene el gas natural, se clasifica en:

###### **7.1.4.1.1. Gas asociado**

Se lo encuentra en los yacimientos disuelto en el petróleo con grandes cantidades de hidrocarburos líquidos. El gas asociado de petróleo es un combustible ecológicamente limpio y de mucha energía. Tomando en cuenta que los volúmenes de extracción de petróleo son elevados, en el mundo ya existe la

práctica de la utilización del gas asociado de petróleo como combustible para la generación de energía eléctrica en grandes y medianas industrias. (Pérez y Martínez, 1995).

#### **7.1.4.1.2. Gas no asociado o libre**

Es el gas que tiene bajo contenido de líquidos disueltos, se obtiene de yacimientos que únicamente contienen gas y no petróleo.

#### **7.1.4.1.3. Gas de condensación retrógrada**

Es un gas intermedio que también lo encontramos en un yacimiento, donde inicialmente se lo tiene como gas y a medida que sale a la superficie se licua al momento que va cambiando sus condiciones de presión. (Pérez y Martínez, 1995).

#### **7.1.4.2. Por su lugar de proveniencia**

De acuerdo a la composición química que presenta el gas natural se clasifica en:

##### **7.1.4.2.1. Gas húmedo**

Es el gas natural que contiene una riqueza de más de 3 galones por millón de pies cúbicos de hidrocarburos líquidos, obteniendo un contenido de componentes más pesados que el metano. Lo cual le permite obtener una gran capacidad calorífica (Pérez y Martínez, 1995).

#### **7.1.4.2.2. Gas seco**

Es un gas natural que está libre de hidrocarburos condensables se compone esencialmente del metano (94-99 %).

#### **7.1.4.3. Por su almacenamiento**

De acuerdo a su estado físico en el que se encuentra el gas natural se clasifica en:

##### **7.1.4.3.1. Gas natural comprimido**

Es un gas seco que se lo lleva a condiciones altas de presión almacenándolo en estado gaseoso.

##### **7.1.4.3.2. Gas natural licuado**

Es el gas natural que se compone principalmente de metano, para ayudar su almacenamiento y transporte se lo somete a un proceso criogénico para bajar su temperatura hasta -161 grados Celsius, para con esto reducir su volumen en una relación 600 a 1. (Pérez y Martínez, 1995).

## **7.2. Generación eléctrica a partir de gas natural**

A continuación, se describe el principio de la generación eléctrica a partir de gas natural.

### **7.2.1. Principios**

La generación eléctrica a partir de gas natural es un proceso de energía no renovable, específicamente energía térmica. Para el proceso de generación de energía se implementa como combustible fósil, el gas natural, el cual es un recurso abundante en varias regiones del mundo, es un componente no tóxico, incoloro e inodoro (Fernández, 2015).

### **7.2.2. Tipo de gas natural utilizado**

Los tipos de gas natural con mayor utilización en la industria de la generación de energía eléctrica son: el gas natural licuado y el gas asociado, debido a que por sus características proveen mayor eficiencia y confiabilidad (Fernández, 2015).

### **7.2.3. Tipos de centrales generadoras**

A continuación, en los siguientes incisos se presentan los tipos de centrales generadoras.

#### **7.2.3.1. Centrales termoeléctricas de ciclo convencional**

Son clásicas o de ciclo convencional las centrales térmicas que utilizan la combustión del carbón, petróleo (aceite) o gas natural, para generar energía eléctrica. Son determinadas como las centrales más económicas y rentables, por lo que su utilización es extensa en el mundo económicamente avanzado y en vías de desarrollo, a pesar de las críticas ocasionadas por su elevado impacto medioambiental (Fernández, 2015).

### 7.2.3.2. Centrales termoeléctricas de ciclo combinado

Es el tipo de central que utiliza gas natural, gasóleo o incluso carbón preparado como combustible para alimentar una turbina de gas. Inmediatamente los gases de escape de la turbina de gas que todavía cuentan con una elevada temperatura, se utilizan para producir vapor que mueve una segunda turbina, esta vez de vapor. Cada una de estas turbinas está acoplada a su correspondiente alternador para generar la electricidad.

Regularmente durante el proceso de partida de estas centrales, sólo funciona la turbina de gas, a este modo de operación se le llama ciclo abierto. Aunque la mayoría de las centrales de este tipo pueden intercambiar combustible (entre gas y diésel) incluso en funcionamiento. Al funcionar con petróleo diésel ven afectada su potencia de salida (baja un 10 %). Como la diferencia de temperaturas que se produce entre la combustión y los gases de escape es mayor que en el caso de una turbina de gas o una de vapor, se consiguen rendimientos superiores de 55 % (Fernández, 2015).

Tabla I. **Tipos de tecnologías de generación de energía eléctrica con gas natural**

<b>Tecnología</b>	<b>Tamaño típico disponible</b>
Turbina a gas de ciclo combinado	35-400 (MW)
Motores de combustión interna	5 (Kw)-10 (MW)
Turbinas de combustión	1-250 (MW)

Fuente: Bolaños y Vargas. (2015). *Propuesta técnica y financiera para la creación de una microcentral de generación de energía eléctrica a partir de gas natural*. Consultado el 3 de agosto de 2020. Recuperado de [https://1library.co/document/yd287egq-propuesta-tecnica-financiera-creacion-microcentral-generacion-energia-electrica.html?utm\\_source=related\\_list](https://1library.co/document/yd287egq-propuesta-tecnica-financiera-creacion-microcentral-generacion-energia-electrica.html?utm_source=related_list).

### **7.3. Sistema Nacional Interconectado**

A continuación, en los siguientes incisos se describe el Sistema Nacional Interconectado.

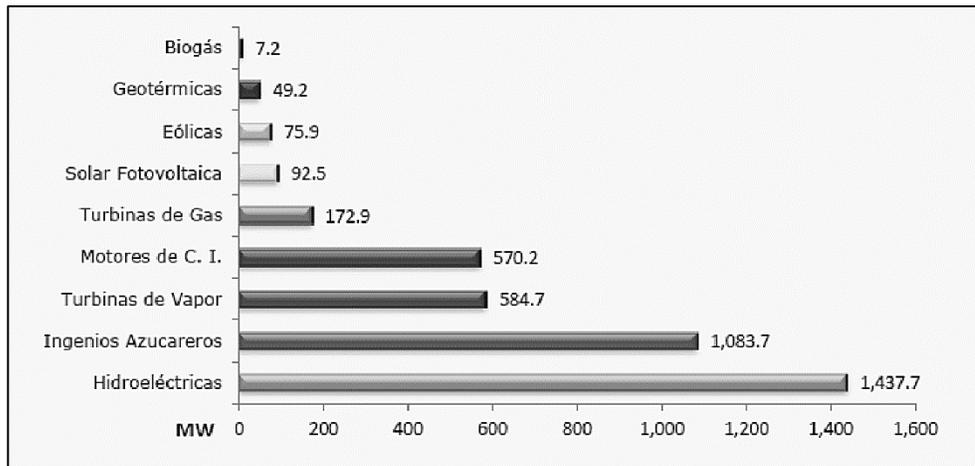
#### **7.3.1. Definición**

El Sistema Nacional Interconectado es el conjunto de instalaciones e infraestructura eléctrica interconectada destinada a la prestación del servicio, encargado de generar, transmitir y distribuir toda la energía eléctrica que se produce en el país, dentro del cual se efectúan las diferentes transferencias de energía eléctrica entre diversas regiones.

#### **7.3.2. Potencia instalada**

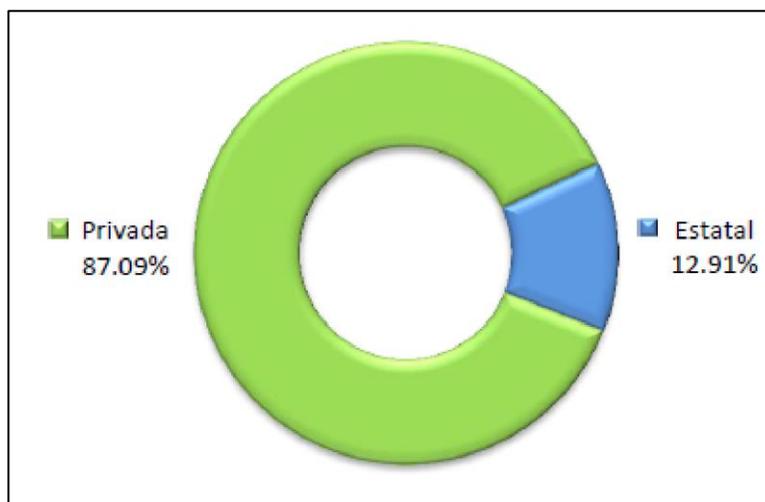
Es la capacidad de energía que puede generar y entregar una central eléctrica en condiciones ideales. Para conocer la potencia instalada del país se tienen que considerar las potencias de todas las unidades generadoras pertenecientes al Sistema Nacional Interconectado.

Figura 1. **Capacidad Instalada del parque generador del SNI en MW, año 2017**



Fuente: MEM. (2017). *Estadísticas subsector eléctrico*

Figura 2. **Capacidad Instalada del parque generador del SNI por tipo de propiedad, año 2017**

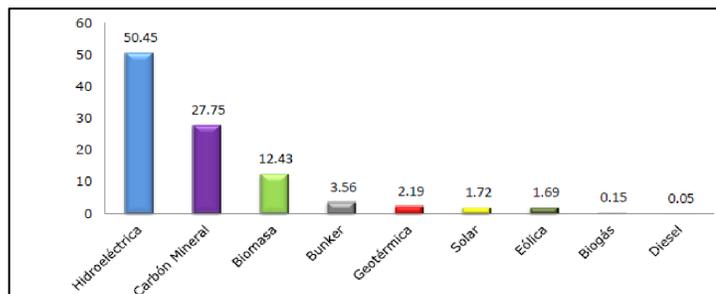


Fuente: MEM. (2017). *Estadísticas subsector eléctrico*.

### 7.3.3. Generación mensual y anual

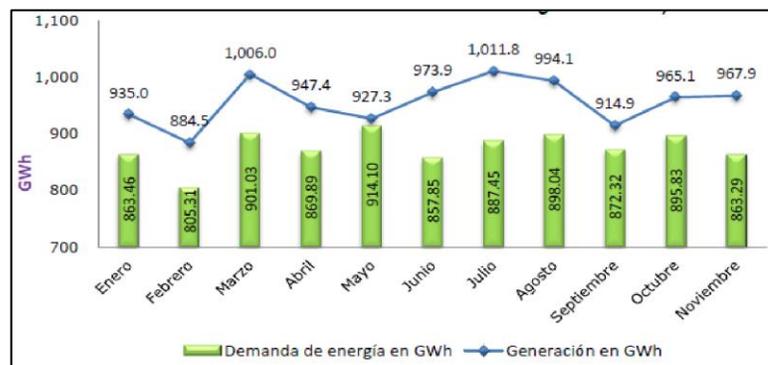
La generación mensual y anual del país está determinada por los tipos de fuentes de generación (combustibles) que aportan para cubrir la demanda energética del país.

Figura 3. **Generación Eléctrica por tipo de combustible en (%), durante el año 2017**



Fuente: MEM. (2017). *Estadísticas subsector eléctrico.*

Figura 4. **Generación mensual vrs demanda de energía eléctrica en GWh**

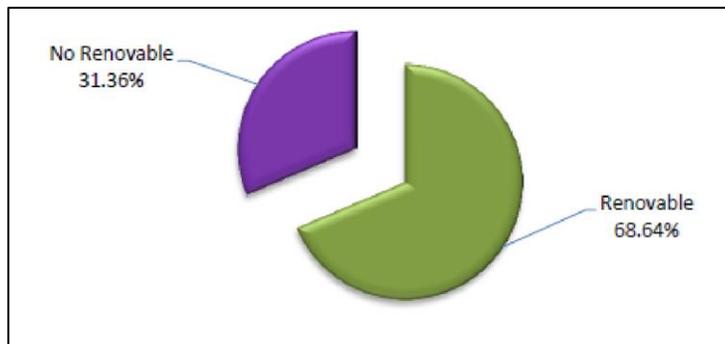


Fuente: MEM. (2017). *Estadísticas subsector eléctrico.*

### 7.3.4. Participación de energía renovable y no renovable

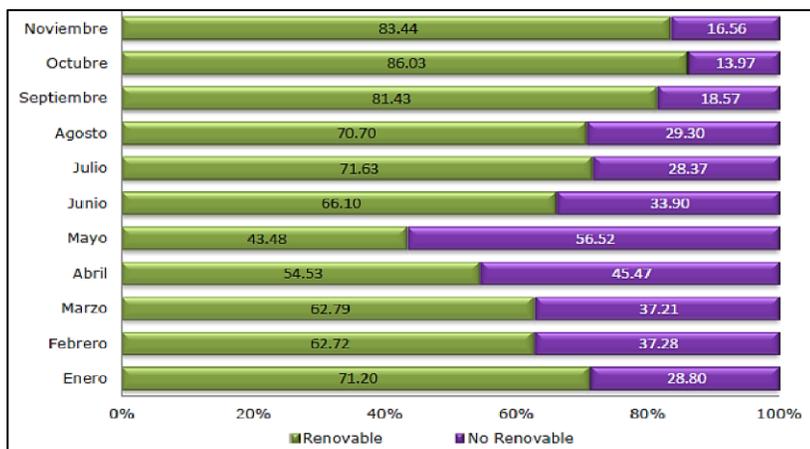
Dado que la matriz de generación eléctrica del país está formada por diversas unidades generadoras, existe participación tanto de fuentes de energía renovable y fuentes de energía no renovable.

Figura 5. **Matriz de Generación Eléctrica por tipo de recurso**



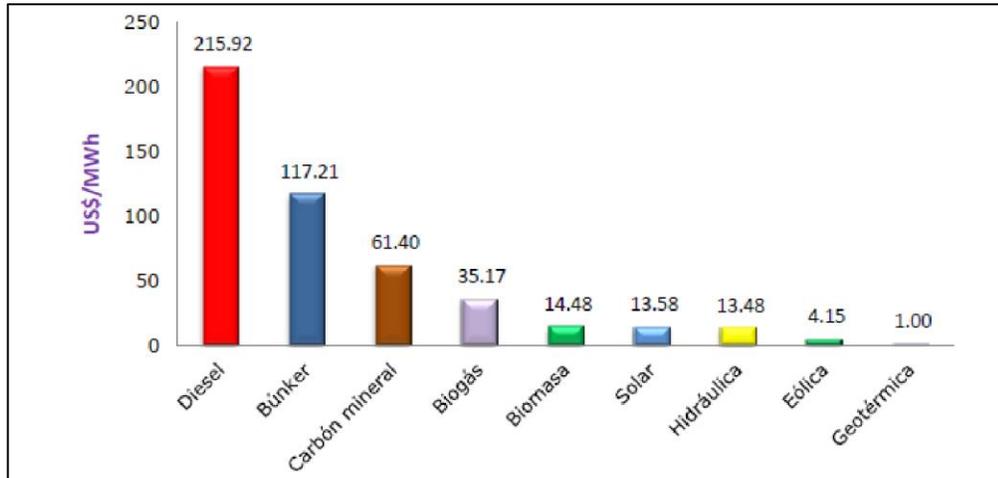
Fuente: MEM. (2017). *Estadísticas subsector eléctrico*.

Figura 6. **Matriz de Generación Eléctrica por tipo de recurso (anual)**



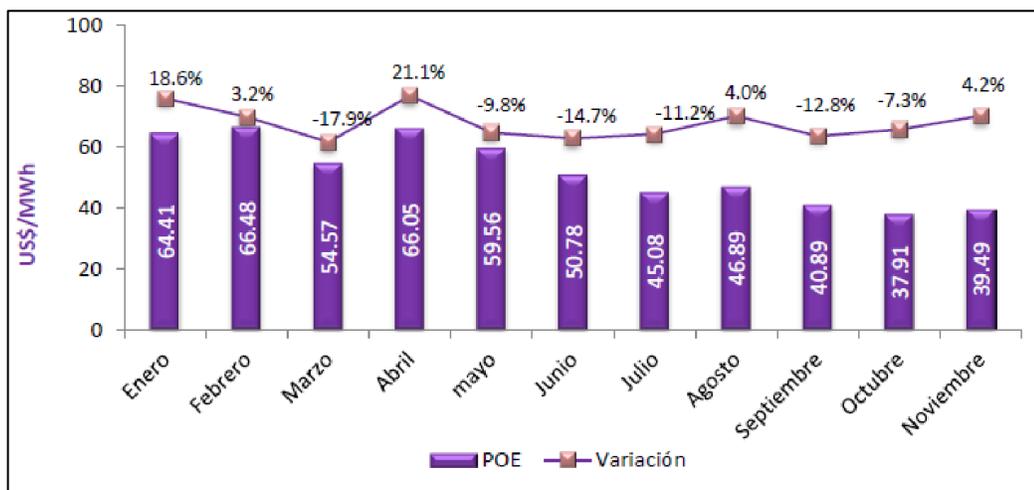
Fuente: MEM. (2017). *Estadísticas subsector eléctrico*.

Figura 7. **Costo Variable de Generación promedio por tipo de recurso en US\$/MWh**



Fuente: MEM. (2017). *Estadísticas subsector eléctrico.*

Figura 8. **Promedio mensual del Precio de Oportunidad de la Energía – POE- o Precio Spot en US\$/MWh**



Fuente: MEM. (2017). *Estadísticas subsector eléctrico.*

El Precio de Oportunidad de la Energía o Precio Spot es el valor del Costo Marginal de Corto Plazo de la Energía en cada hora, establecido por el AMM como resultado del despacho económico de carga.

### **7.3.5. Legislación para la participación de nuevas fuentes de energía**

A continuación, se describen las leyes establecidas por el Ministerio de Energía y Minas para las nuevas fuentes de energía.

#### **7.3.5.1. Ministerio de Energía y Minas**

El Ministerio de Energía y Minas (MEM) es el órgano del Estado responsable de elaborar y coordinar políticas, planes oficiales y programas indicativos relativos al sector energético en Guatemala. Es el encargado de velar porque el proceso de autorización para la instalación de centrales y prestación del servicio de exploración, explotación, transporte y distribución de hidrocarburos se realice conforme a la ley vigente. Asimismo, le concierne atender lo que se refiere al régimen jurídico de la generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica.

El Acuerdo Gubernativo No. 244-2003 *Procedimiento de inscripción y vigencia en el registro de agentes y grandes usuarios del mercado mayorista del Ministerio de Energía y Minas, su acreditación y consecuencias de su incumplimiento ante el Administrador del Mercado Mayorista* es el que establece las bases y los lineamientos a seguir al momento de la incorporación o adición de un agente generador a la matriz energética del país.

## Artículo 1.

Presentación de Solicitudes. Toda solicitud para inscribirse en el Registro del Ministerio de Energía y Minas, como Agentes del Mercado Mayorista en calidad de: Generadores, Transportistas, Distribuidores, Comercializadores incluyendo Importadores y Exportadores; y como Grandes Usuarios, será presentada ante la Dirección General de Energía, dependencia del Ministerio de Energía y Minas. La Dirección General de Energía recibirá y tramitará las solicitudes para tal efecto, llenando los requisitos generales siguientes:

- Memorial de solicitud de inscripción, dirigido al Ministerio de Energía y Minas, firmado por el Representante Legal, en el cual deberá señalar lugar para recibir notificaciones.
- Para personas jurídicas, fotocopias legalizadas de: a) testimonio de la escritura de constitución social de la entidad y sus modificaciones, b) patentes de comercio de empresa y de sociedad, c) acta de nombramiento del Representante Legal de la entidad, debidamente razonado por el Registro correspondiente, y d) DPI o pasaporte del Representante Legal.
- Para personas individuales, fotocopias legalizadas de: a) DPI o pasaporte, y b) patente de comercio.
- Las solicitudes y documentación adjunta deberán ser presentadas en original y copia.

- Si la solicitud de inscripción fuera formulada por Agentes Generadores, Transportistas o Distribuidores, deberán acompañar fotocopia legalizada del Contrato de Autorización Definitiva para Uso de Bienes de Dominio Público, suscrito con el Ministerio de Energía y Minas, en los casos que corresponda.

## Artículo 2. Requisitos para ser Inscritos.

### Generadores:

- Declaración jurada de las características técnicas de sus unidades generadoras y documentación en que se demuestre que la potencia que dichas unidades pueden suministrar a la red, sea de por lo menos 10 MW en el sitio de ubicación de la planta, libre de consumos internos.
- Resolución de aprobación de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, de los estudios de acceso al sistema de transporte.

### Transportistas:

- Reporte de los Agentes, Grandes Usuarios e Integrantes del Mercado Mayorista, que estarán conectados a su sistema de transporte, con datos de la Potencia Firme y la vigencia de su contrato, la Potencia Firme conectada deberá ser igual o mayor de 10 MW.
- Resolución de aprobación de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, de los estudios de acceso al sistema de transporte.

Distribuidores:

- Declaración Jurada mediante acta notarial, de contar con un mínimo de 20,000 usuarios.
- Resolución de aprobación de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, de los estudios de acceso al sistema de transporte.

Comercializadores, incluyendo Importadores y Exportadores:

- Declaración Jurada mediante acta notarial, de las condiciones contractuales de compra o venta de bloques de potencia y su energía asociada, que incluya especialmente la condición de compra o venta independiente de bloques de energía asociados a una potencia firme de por lo menos 10 MW en forma mensual, requisito indispensable para ser inscrito en el Registro y mantener vigente dicha calidad.
- El periodo de la vigencia de la inscripción para los comercializadores, estará sujeto al plazo de su contrato, ya sea de 10 MW de Oferta Firme o 10 MW de Demanda Firme.

Artículo 3. Dictámenes.

Si el solicitante cumple con los requisitos técnicos y legales, la Dirección General de Energía emitirá opinión, recomendando la emisión de la resolución ministerial correspondiente.

Si del análisis de la documentación presentada se comprueba que faltan requisitos para su inscripción, se rechazará la misma.

#### Artículo 4. Registro.

Si el solicitante cumple los requisitos establecidos en el presente Acuerdo, el Ministerio resolverá su inscripción en el Registro correspondiente, caso contrario rechazará la solicitud, notificando lo resuelto.

#### Artículo 5. Cumplimiento de Condiciones de Agentes y Grandes Usuarios para Mantener su Inscripción en el Registro.

La inscripción en el Registro de Agentes y Grandes Usuarios en el Ministerio de Energía y Minas, determina su calidad por el cumplimiento de los requisitos mínimos establecidos en el Artículo 2 del presente Acuerdo, los cuales serán comprobados por el Administrador del Mercado Mayorista, quien deberá informar cada mes calendario, bajo su absoluta responsabilidad a la Dirección General de Energía, de quien no cumple con los requisitos establecidos en el presente Acuerdo, en cuyo caso el Ministerio de Energía y Minas cancelará la respectiva inscripción en el Registro.

#### Artículo 6. Vigencia de la Inscripción en el Registro.

Los Agentes y Grandes Usuarios del Mercado Mayorista, para mantener la vigencia de su inscripción en el Registro, deberán cumplir con los requisitos mínimos de su inscripción inicial, por lo menos en dos meses de cada trimestre consecutivo dentro del año estacional vigente, salvo caso fortuito o fuerza mayor plenamente justificado y acreditado tan pronto acontezca el hecho que lo origina. En estos casos el interesado, solicitará al Ministerio de Energía y Minas, una suspensión temporal hasta por el plazo

de un año, de su inscripción en el Registro respectivo. Transcurrido este plazo, de no solicitar su reincorporación, su inscripción en el Registro será cancelada de oficio definitivamente.

#### Artículo 7. Acreditación.

Inscrito el Agente o Gran Usuario en el Registro correspondiente, podrá solicitar al Ministerio de Energía y Minas, a su costa se le extienda la certificación de su inscripción.

#### Artículo 8. Consecuencias Derivadas de la Falta de Acreditación.

El Administrador del Mercado Mayorista, sin más trámite rechazará o no admitirá transacciones de los Agentes o Grandes Usuarios que no cumplan con la presentación del requisito de acreditación de su inscripción en el Registro.

#### Artículo 9. Ejecución de Medidas como Consecuencia de Incumplimientos.

El Ministerio de Energía y Minas, por medio de los reportes mensuales que le remite el Administrador del Mercado Mayorista, a través de la Dirección General de Energía en forma trimestral, determinará la vigencia de la inscripción en el Registro. En caso de comprobar el incumplimiento del Artículo 6 del presente Acuerdo, se le correrá audiencia por cinco (5) días al Agente o Gran Usuario que incumple, para que se pronuncie respecto a su situación. Vencido el plazo señalado, el Ministerio de Energía y Minas resolverá lo que corresponda y en su caso informará a la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, del incumplimiento y la cancelación de su inscripción en el Registro del Ministerio de Energía y Minas.

La Comisión Nacional de Energía Eléctrica deberá informar al Agente que se le haya cancelado su inscripción, que ya no podrá realizar transacciones o entregas, demandas y/o consumos en el Mercado Mayorista y que deberá tomar las acciones necesarias para continuar sus operaciones en un plazo máximo de diez días.

Para el caso de Grandes Usuarios que se les haya cancelado su inscripción en el Registro, la Comisión Nacional de Energía Eléctrica les informará que cuentan con un plazo de diez días y si aún no se tomaron las acciones pertinentes, la Comisión Nacional de Energía Eléctrica instruirá al Transportista o Distribuidor correspondiente, para que proceda inmediatamente, con cargo y por cuenta de quien incumplió, a la desconexión respectiva, además instruirá al Administrador del Mercado Mayorista para que a partir de esa fecha no se considere ninguna Transacción Comercial y/o entrega, demanda o consumo de los Agentes o Grandes Usuarios que se les haya cancelado su inscripción en el Registro del Ministerio de Energía y Minas.

Los incumplimientos de los Comercializadores o Generadores que atiendan dentro de su demanda a usuarios que no llenen los requisitos establecidos en el presente Acuerdo, serán reportados a la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (Acuerdo Gubernativo No. 244-2003, 2003, p. 2-5).

#### **7.4. Modelo de simulación**

A continuación, en los siguientes incisos se presenta el programa encargado de realizar la simulación.

#### **7.4.1. Bases**

La incorporación de Gas Natural al Sistema Nacional Interconectado como una alternativa de sustitución de los combustibles fósiles utilizados para generar energía eléctrica, así como los riesgos y las estrategias necesarias para la introducción de esta nueva fuente primaria de generación a la matriz energética, son las bases para determinar el modelo ideal para la simulación.

#### **7.4.2. Parámetros**

Los parámetros que permitirán llevar a cabo la simulación del modelo están asociados a los contratos, volúmenes de entrega, precios, costos de embarque, los procesos de recepción, el almacenamiento, la potencia instalada a sustituir por la generación a partir de gas natural, la energía generada, las emisiones de gases de efecto invernadero por parte del carbón y el gas natural y los agentes participantes en el Sistema Nacional Interconectado.

#### **7.4.3. Plataforma de simulación SimSEE**

SimSEE es una plataforma de Simulación de Sistemas de Energía Eléctrica. Esta permite crear simuladores a medida de un sistema de generación, para su aplicación tanto en el largo plazo (Planificación de Inversiones) como en el corto plazo (Operación del Sistema y Simulación del Mercado).

SimSEE permite a los diferentes participantes del mercado (o Sistema Eléctrico) simular la operación futura del sistema incorporando distintos tipos de pronósticos, como pueden ser generación de energías renovables, demanda eléctrica, precios futuros de tecnologías y combustibles, intercambios internacionales, etc.

Permite analizar con información estadística detallada, la evolución de variables de interés, como ser los volúmenes de energía y dinero intercambiados de cada participante con el mercado, la rentabilidad de proyectos específicos y cálculos de precios y riesgos para el diseño de contratos.

## 8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN

1. ANTEDECENTE DE LA INVESTIGACIÓN

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Gas natural

2.1.1. Definición

2.1.2. Origen

2.1.3. Composición

2.1.4. Tipos

2.1.4.1. Por su lugar de proveniencia

2.1.4.1.1. Gas asociado

2.1.4.1.2. Gas no asociado o libre

2.1.4.1.3. Gas de condensación  
retrógrada

2.1.4.2. Por su lugar de proveniencia

2.1.4.2.1. Gas húmedo

- 2.1.4.2.2. Gas seco
      - 2.1.4.3. Por su almacenamiento
        - 2.1.4.3.1. Gas natural comprimido
        - 2.1.4.3.2. Gas natural licuado
  - 2.2. Generación eléctrica a partir de gas natural
    - 2.2.1. Principios
    - 2.2.2. Tipo de gas natural utilizado
    - 2.2.3. Tipos de centrales generadoras
      - 2.2.3.1. Centrales termoeléctricas de ciclo convencional
      - 2.2.3.2. Centrales termoeléctricas de ciclo combinado
  - 2.3. Sistema Nacional Interconectado
    - 2.3.1. Definición
    - 2.3.2. Potencia Instalada
    - 2.3.3. Generación mensual y anual
    - 2.3.4. Participación de energía renovable y no renovable
    - 2.3.5. Legislación para la participación de nuevas fuentes de energía
      - 2.3.5.1. Ministerio de Energía y Minas
  - 2.4. Modelo de simulación
    - 2.4.1. Bases
    - 2.4.2. Parámetros
    - 2.4.3. Plataforma de simulación SimSEE
3. RECOLECCIÓN Y COMPILACIÓN DE DATOS
4. ANÁLISIS DE DATOS OBTENIDOS

5. REPORTE DE RESULTADOS Y ANÁLISIS ECONÓMICO

6. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

ANEXOS



## 9. METODOLOGÍA

### 9.1. Tipo de estudio

El presente estudio es de tipo cuantitativo descriptivo. En este se realizará la propuesta de un estudio de factibilidad técnica y económica de la integración de energía eléctrica generada a partir de gas natural como alternativa al Sistema Nacional Interconectado de Guatemala.

### 9.2. Definición de variables

A continuación, en la Tabla II, se presentan las definiciones de las variables seleccionadas para este estudio.

Tabla II. **Definición de variables**

<b>Variable</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Definición operacional</b>
Potencia instalada	Es la capacidad de energía que puede generar y entregar una central eléctrica en condiciones ideales.	Se medirá en kilovatios (kW) o megavatios (MW). Se determinará mediante la investigación bibliográfica y la información obtenida del modelo de simulación.
Energía eléctrica generada	La energía eléctrica se considera como una fuente de energía secundaria. Por esta razón, tiene que ser producida por transformación de una fuente de energía primaria. En el proceso de transformación, el rendimiento siempre menor que 100%, se produce dentro de las centrales de generación de energía eléctrica.	Se medirá en kilovatios hora (kWh). Se determinará mediante la investigación bibliográfica y la información obtenida del modelo de simulación.

Continuación de la tabla II.

Cantidad de gas natural	Gas natural necesario para generar de energía obtenida a partir de carbón	Se medirá en unidad térmica británica sobre pie cúbico (btu/ft <sup>3</sup> ). Se determinará mediante la investigación bibliográfica.
Emisiones de gases de efecto invernadero	Un gas de efecto invernadero (GEI) es un gas atmosférico que absorbe y emite radiación dentro del rango infrarrojo.	Se determinará el porcentaje (%) los siguientes gases CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O y se obtendrán mediante la investigación bibliográfica.
Inversión en proyectos	Una inversión es la colocación de capital para obtener una ganancia futura, en este caso en un proyecto.	Se medirá en dólares (\$). Se determinará mediante la investigación bibliográfica y la información obtenida del modelo de simulación.

Fuente: elaboración propia.

### 9.3. Fases del estudio

A continuación, se describen las fases necesarias del estudio.

#### 9.3.1. Fase 1: Exploración bibliográfica

Se describirá de acuerdo a la teoría, el gas natural, la generación eléctrica a partir del mismo. Se describirá que es el sistema nacional interconectado, la potencia instalada y generación anual. También la legislación para la participación de nuevas fuentes de energía, así como las bases, los parámetros y la plataforma de simulación en la que se realizará el modelo.

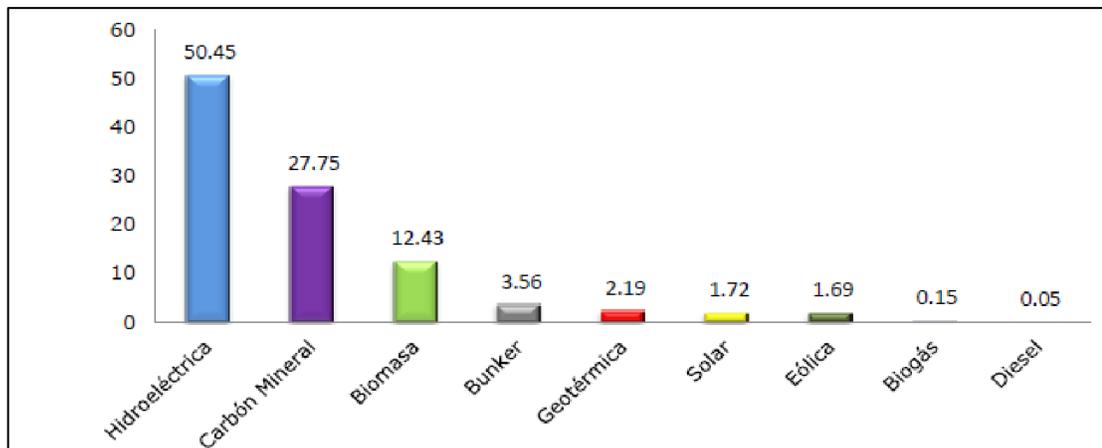
#### 9.3.2. Fase 2: Recolección y compilación de datos

Para la recolección y compilación de datos se analizarán estudios, reportes e investigaciones que traten de los siguientes temas:

### 9.3.2.1. Centrales generadoras de energía eléctrica a partir de carbón, búnker y diésel instaladas en el país y su capacidad de contribución en el SIN

Los datos de las centrales generadoras de electricidad a partir de carbón, búnker y diésel instaladas en el país se obtendrán del estadístico del subsector eléctrico que presenta el Ministerio de Energía y Minas (MEM) anualmente como se muestra en la figura 1, la cual detalla la generación eléctrica por tipo de combustible en (%), durante un año específico.

Figura 9. **Generación Eléctrica por tipo de combustible en (%), durante el año 2017**



Fuente: MEM. (2017). *Estadísticas subsector eléctrico*.

La información obtenida de la figura 1 se tabulará como se muestra en la tabla III, la cual permitirá tener un mejor orden y facilitará el posterior ingreso de la misma a la plataforma de simulación que se utilizará en la elaboración del modelo.

Tabla III. **Generación anual por tipo de combustible**

Tipo de combustible	% Generado anual
Carbón	000
Búnker	000
Biomasa	000

Fuente: elaboración propia.

**9.3.2.2. Fuentes de gas natural que permitan sustituir alguna fracción de la energía eléctrica generada a partir de otros combustibles fósiles**

La información de los tipos de fuentes de gas natural que permitirían sustituir alguna fracción de la energía eléctrica generada a partir de combustibles fósiles se obtendrá de una investigación bibliográfica. La misma se tabulará como se muestra en la tabla III, la cual permitirá tener un mejor orden y facilitará su posterior análisis.

Tabla IV. **Fuentes de gas natural que permitan sustituir la generación a partir de combustibles fósiles**

Fuente de gas natural	Capacidad de generación (MWh)	Fracción a sustituir (%)

Fuente: elaboración propia.

### **9.3.2.3. Porcentaje de emisión de gases de efecto invernadero que producen la generación a partir de combustibles fósiles y a partir de gas natural.**

Se recolectarán los datos del porcentaje de gases de efecto invernadero emitidos por las plantas generadoras de carbón, búnker y diésel, así como por las plantas generadoras de gas natural a nivel mundial realizando una investigación bibliográfica. La misma se tabulará como se muestra en la tabla V, la cual permitirá tener un mejor orden y facilitará su posterior análisis.

Tabla V. **Porcentaje de emisiones de GEI por centrales generadoras a partir de combustibles fósiles y gas natural**

<b>Plantas generadoras a partir de combustibles fósiles</b>	<b>Plantas generadoras a partir de gas natural</b>	<b>Emisiones de GEI (%)</b>
Carbón	Ciclo convencional	000
Diésel	Ciclo combinado	000

Fuente: elaboración propia.

### **9.3.2.4. Tipos de contratos de generación a partir de gas natural que sean viables en Guatemala**

Se realizará una investigación bibliográfica para obtener la información acerca de los tipos de contratos de generación a partir de gas natural que existen a nivel mundial. Esta información se tabulará como se muestra en la tabla VI, esto para poder tener una mejor visión de la misma, facilitar su ingreso a la plataforma de simulación que se utilizará en la elaboración del modelo, para así

poder llevar a cabo el análisis que determinará cual es el contrato con mayor viabilidad en Guatemala.

Tabla VI. **Tipos de contratos de generación a partir de gas natural**

<b>Tipo de contrato</b>	<b>Tipo de central generadora que presenta el contrato</b>	<b>Tipo de gas natural a utilizar que presneto el contrato</b>

Fuente: elaboración propia.

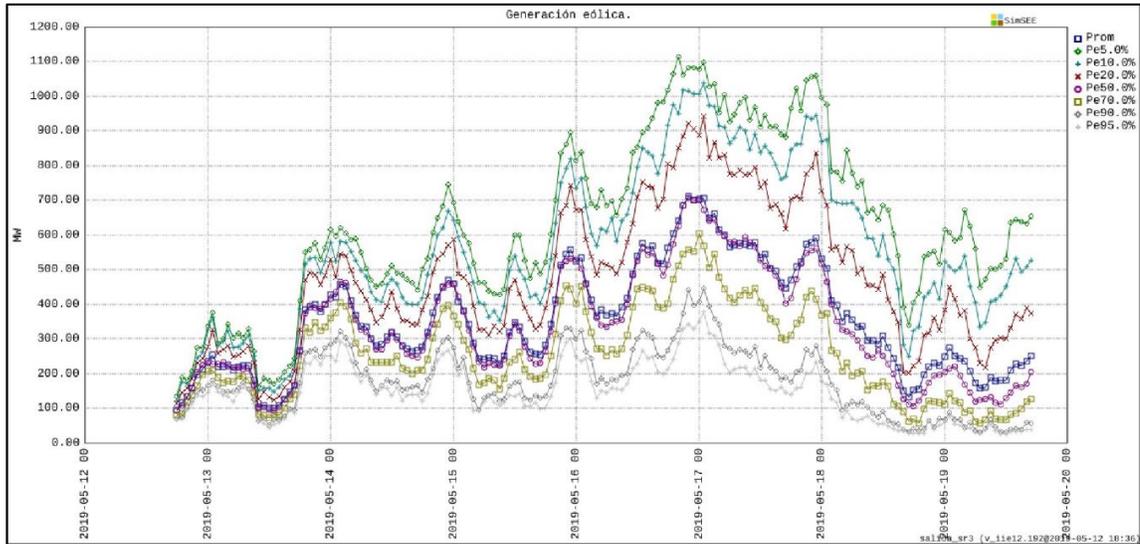
### **9.3.3. Fase 3: Análisis de datos obtenidos**

Se procede a ingresar a la plataforma de simulación SimSEE la información necesaria para determinar las bases y establecer los parámetros a utilizar para la realización del modelo que se propondrá. De esta simulación se obtendrá lo siguiente:

#### **9.3.3.1. Gráficas de la operación futura que tendría el sistema incorporando el gas natural como fuente de generación alternativa, distintos tipos de pronósticos, como generación a partir de energías renovables, demanda eléctrica, precios futuros de tecnologías y combustibles**

En la figura 10 se puede observar el ejemplo de una gráfica obtenida del simulador, la cual que presenta el pronóstico de la generación de electricidad incorporando fuentes renovables al SIN.

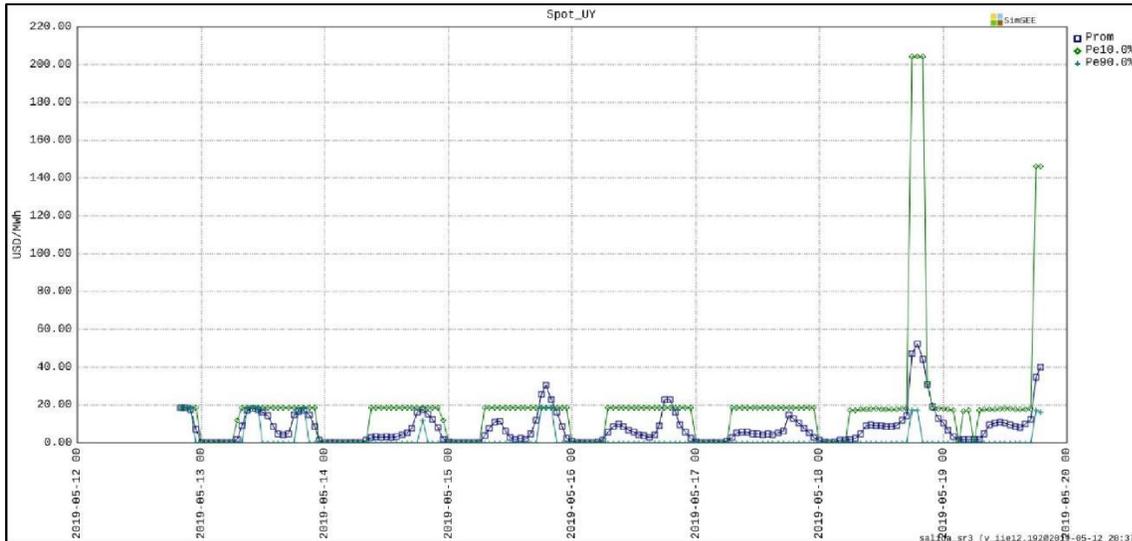
Figura 10. Pronóstico de generación incorporando fuentes renovables



Fuente: SimSEE. (s.f.). *Usos del SimSEE*. Consultado el 2 de septiembre de 2020. Recuperado de <https://www.simsee.org/simsee/ usos.html>.

En la figura 11 se puede observar el ejemplo de una gráfica obtenida del simulador, la cual presenta la proyección del costo de generación a partir de combustibles fósiles.

Figura 11. **Proyección del costo de generación a partir de combustibles fósiles**



Fuente: SimSEE. (s.f.). *Usos del SimSEE*. Consultado el 2 de septiembre de 2020. Recuperado de <https://www.simsee.org/simsee/usuarios.html>.

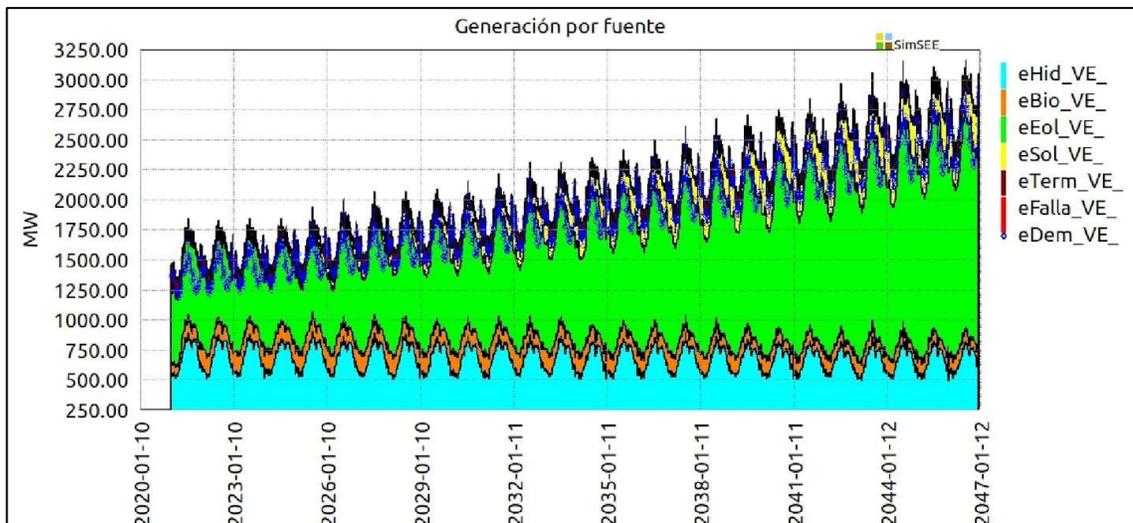
#### 9.3.4. Fase 4: Reporte de análisis económico

Con los datos e información obtenida de la fase 2 y 3 se procede a realizar un análisis de proyección a largo plazo de la interacción del mercado eléctrico y costos de proyectos que involucren fuentes de energías limpias.

### 9.3.4.1. Información detallada de volúmenes de energía y dinero intercambiados de cada participante con el mercado, la rentabilidad de proyectos específicos y cálculos de precios y riesgos para el diseño de contratos

En la figura 12 se puede observar el ejemplo de una gráfica obtenida del simulador, la cual presenta los volúmenes de energía intercambiados a largo plazo en el mercado eléctrico nacional.

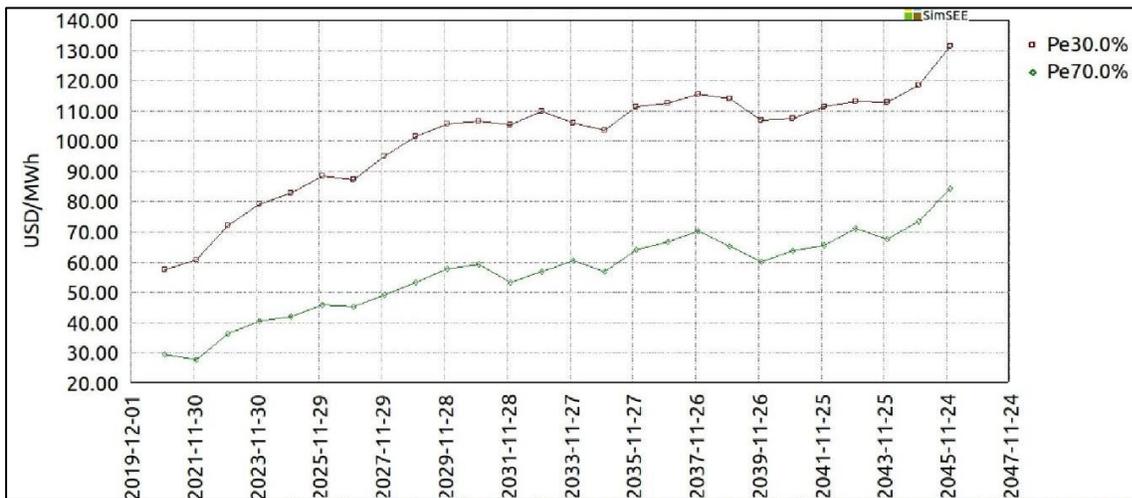
Figura 12. **Proyección de volúmenes de energía intercambiados a largo plazo en el mercado eléctrico**



Fuente: SimSEE. (s.f.). *Usos del SimSEE*. Consultado el 2 de septiembre de 2020. Recuperado de <https://www.simsee.org/simsee/usos.html>.

En la figura 13 se puede observar el ejemplo de una gráfica obtenida del simulador, la cual presenta la proyección del costo marginal de dos proyectos que involucran nuevas fuentes de generación.

Figura 13. **Proyección del costo marginal promedio anual**



Fuente: SimSEE. (s.f.). *Usos del SimSEE*. Consultado el 2 de septiembre de 2020. Recuperado de <https://www.simsee.org/simsee/usuarios.html>.

### 9.3.5. Fase 5: Presentación y discusión de resultados

Se presentará un estudio que permitirá determinar la factibilidad técnica y económica de proyectos de generación de energía eléctrica a partir de gas natural en Guatemala, utilizando el modelo de simulación realizado. Teniendo como base la información obtenida del análisis de las tablas y gráficas presentadas en las fases anteriores, así como los datos estadísticos obtenidos de las mismas. Dicha información es:

- El impacto ambiental de la generación a partir de gas natural y a partir de combustibles fósiles.
- La cantidad óptima de energía eléctrica que aportará el gas natural como alternativa al SNI.
- El tipo de contrato con mayor viabilidad en el país y que se adapte mejor a las condiciones económicas y energéticas del país.
- Los datos de la cantidad de energía óptima que aportará el gas natural y la proyección de generación a largo plazo, asimismo la viabilidad de la inclusión de esta fuente de generación como alternativa.

Asimismo, el estudio incluirá la tabla VII la cual presentará un resumen de los datos de factibilidad técnica y económica de proyectos orientados a la generación de energía eléctrica a partir de gas natural y los comparará con datos de otros proyectos orientados a la generación de energía eléctrica a partir de otras fuentes de energía limpia.

**Tabla VII. Comparación de factibilidad técnica y económica de proyectos de generación a partir de fuentes de energía limpia**

<b>Proyectos de generación a partir fuentes de energía limpia</b>	<b>Factibilidad técnica</b>	<b>Factibilidad económica</b>
Gas natural	xxx	xxx
Solar	xxx	xxx

Fuente: elaboración propia.



## 10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS

La información de los estudios previos será catalogada de acuerdo a los datos de centrales generadoras de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles instaladas en el país y los datos obtenidos del modelo de simulación de la integración de energía eléctrica generada a partir de gas natural como alternativa al SNI del país.

Para ello se utilizarán las siguientes herramientas de recolección de datos:

- Gráfico de generación eléctrica por tipo de combustible en (%), durante un año.
- Tabla de generación anual por tipo de combustible.
- Tabla de fuentes de gas natural que permitan sustituir la generación a partir de combustibles fósiles.
- Tabla de porcentaje de emisiones de GEI por centrales generadoras a partir de combustibles fósiles y gas natural.
- Tabla de tipos de contratos de generación a partir de gas natural.
- Gráfico de proyección de volúmenes de energía intercambiados a largo plazo en el mercado eléctrico.

Las herramientas estadísticas por utilizar serán:

- Gráfico de dispersión de la proyección del costo marginal promedio anual de proyectos que involucran nuevas fuentes de generación.
- Tabla de comparación de factibilidad técnica y económica de proyectos de generación a partir de fuentes de energía limpia.

- Gráfico de dispersión del pronóstico de generación incorporando fuentes renovables al SNI.
- Gráfico de dispersión de la proyección del costo de generación a partir de combustibles fósiles.
- Tasa de comparación entre opciones de contratos de generación a partir de gas natural.

## 11. CRONOGRAMA

Tabla VIII. Cronograma de actividades

Actividad	2021					
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Fase 1: Exploración bibliográfica.	■	■	■			
Fase 2: Recolección y compilación de datos		■	■	■		
Fase 3: Análisis de datos obtenidos				■	■	
Fase 4: Reporte de análisis económico					■	■
Fase 5: Presentación y discusión de resultados						■

Fuente: elaboración propia.



## 12. RECURSOS NECESARIOS Y FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

El presente estudio se realizará a cabo con fondos propios del estudiante de maestría. Dado que el estudio es de tipo descriptivo, se tendrán en consideración los siguientes recursos:

Tabla IX. **Recursos necesarios para el estudio**

<b>Recurso</b>	<b>Costo</b>
Software	Q 150.00
Transporte	Q 300.00
Asesor	Q 2,500.00
<b>Total</b>	<b>Q 2,950.00</b>

Fuente: elaboración propia.

Siendo los recursos aportados suficientes para el estudio, se considera que es factible la realización del mismo.



### 13. REFERENCIAS

1. Abur, A., Alvarado, F., Bel, C., Cañizares, C., Pidre, J., Navarro, A. y Expósito, A. (2002). *Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica*. México: McGraw-Hill.
2. Acuerdo Gubernativo No. 244-2003. Procedimiento de inscripción y vigencia en el registro de agentes y grandes usuarios del mercado mayorista del ministerio de energía y minas, su acreditación y consecuencias de su incumplimiento ante el administrador del mercado mayorista. Ministerio de Energía y Minas. Guatemala. 29 de abril de 2003.
3. Amell, A., Agudelo, J. y Cadavid, F. (2002). *El gas natural: nuevo vector energético* (Tesis de licenciatura). Universidad de Antioquia, Colombia. Recuperado de <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/6178>.
4. Bohórquez, N. y Durán-Tovar, I. (Diciembre, 2018). Integración de fuentes no convencionales de energía renovable dentro del mercado eléctrico mayorista. *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, (112), 45-55. Recuperado de <http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci/article/view/74/65>.

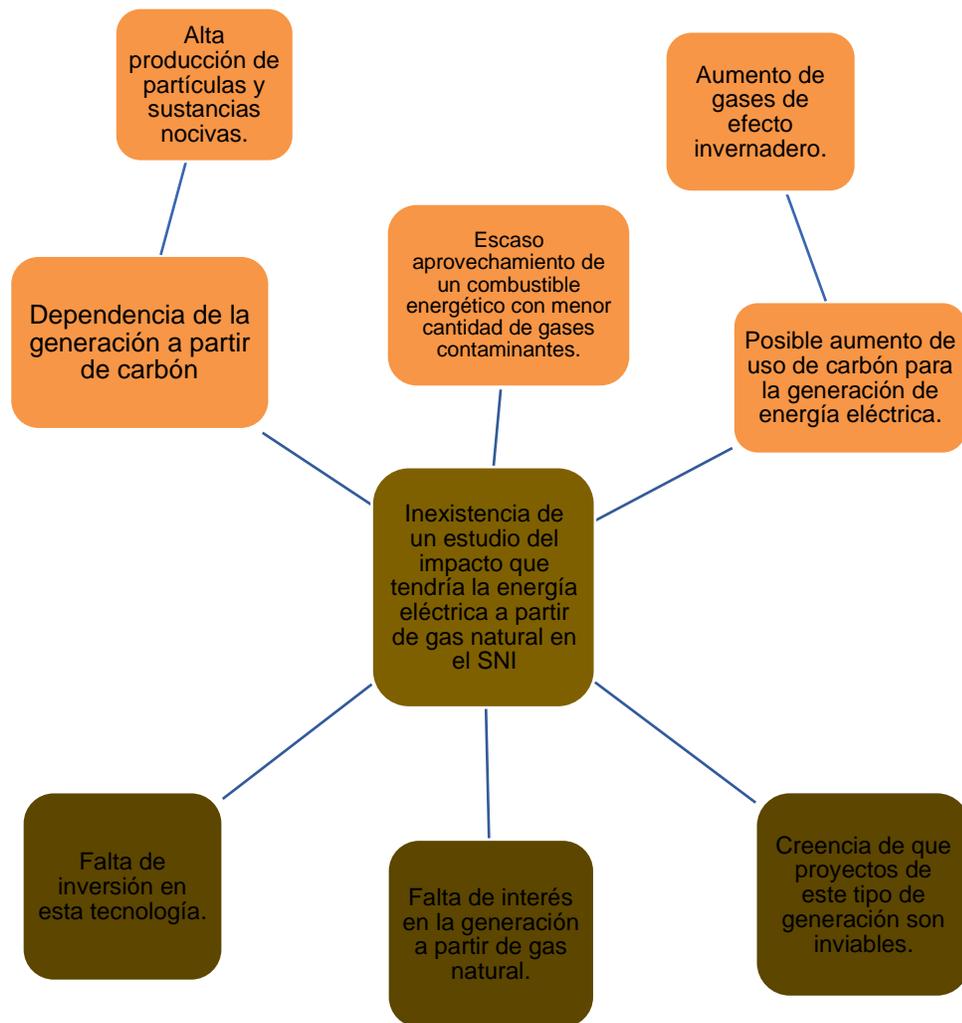
5. Bolaños, L. y Vargas, Y. (2015). *Propuesta técnica y financiera para la creación de una microcentral de generación de energía eléctrica a partir de gas natural* (Tesis de licenciatura). Universidad del Cauca, Colombia. Recuperado de [https://1library.co/document/yd287egq-propuesta-tecnica-financiera-creacion-microcentral-generacion-energia-electrica.html?utm\\_source=related\\_list](https://1library.co/document/yd287egq-propuesta-tecnica-financiera-creacion-microcentral-generacion-energia-electrica.html?utm_source=related_list).
6. Briglia, E., Ron, F., Esponda, P., Bouvier, A., Alaggia, S. y Abreu, N. (Abril, 2013). Integración del Mercado Eléctrico y el mercado de gas natural en los modelos de optimización y simulación del SimSEE. *ELAEE*, 1(17), 1-30. Recuperado de [https://simsee.org/simsee/biblioteca/anii\\_fse\\_2013\\_10957\\_OptimA\\_GNL/paper\\_regas\\_UTE\\_ELAEE2013.pdf](https://simsee.org/simsee/biblioteca/anii_fse_2013_10957_OptimA_GNL/paper_regas_UTE_ELAEE2013.pdf).
7. Brucart, E. (1982). *El Gas Natural*. España: Reverte.
8. Cáceres, L. (2002). *El Gas Natural*. Lima, Perú: Editorial Independiente.
9. Colás, M. (2016). *Análisis del mercado eléctrico: desde generación hasta comercialización* (Tesis de licenciatura). Universidad Pública de Navarra, España. Recuperado de <http://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/20137/Col%C3%A1s%20Elizalde,%20Mikel%20TFG.pdf?sequence=1>.
10. Correa, T. y Castrillón, E. (Diciembre, 2008). Almacenamiento de gas natural. *Tecno Lógicas*, (21), 145-167. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/3442/344234274010.pdf>.

11. Díaz, S., Gomez, Y., Silva, J. y Noriega, E. (Diciembre, 2017). Estudio comparativo de modelos de mercados eléctricos en países de America Latina. *Espacios*, 38(58), 12-22. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/321757954\\_Estudio\\_comparativo\\_de\\_modelos\\_de\\_mercados\\_electricos\\_en\\_paises\\_de\\_America\\_Latina\\_Electrical\\_market\\_models\\_comparative\\_study\\_in\\_Latinamerica\\_Contentido](https://www.researchgate.net/publication/321757954_Estudio_comparativo_de_modelos_de_mercados_electricos_en_paises_de_America_Latina_Electrical_market_models_comparative_study_in_Latinamerica_Contentido).
12. Estrada, M., Duque, B. y Rendón, J. (2016). *Análisis comparativo de diferentes esquemas de suficiencia en generación eléctrica: Algunas reflexiones para el mercado eléctrico en Colombia* (Tesis de maestría). Universidad EAFIT, Colombia. Recuperado de <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/11318>.
13. Fernández, F. (2015). *Análisis de mercados eléctricos interconectados con restricciones de red* (Tesis doctoral). Universidad Pontificia Comillas, España. Recuperado de <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/6287>.
14. MEM. (2017). *Estadísticas Subsector Eléctrico*. Guatemala: Autor.
15. Pérez, R. y Martínez, J. (1995). *Ingeniería de Gas Natural, Características y Comportamiento de los Hidrocarburos*. Maracaibo, Venezuela: Ingenieros Consultores, S.R.L. Recuperado de [https://profesormario.files.wordpress.com/2012/03/ingenieria\\_de\\_gas\\_-m-\\_martinez.pdf](https://profesormario.files.wordpress.com/2012/03/ingenieria_de_gas_-m-_martinez.pdf).

16. Pino, F. (2010). *Endulzamiento del Gas Natural*. Venezuela: Universidad de Oriente. Recuperado de <https://carteleraelectronica.files.wordpress.com/2011/12/endulzamiento-de-gas-natural.pdf>.
17. Prieto, E. (Septiembre, 2013). Estudio de un Sistema de Recolección, Manejo y Distribución de Gas Metano para Generación de Electricidad en un Campo Petrolero Venezolano. *TAU*, 1(1), 1-27. Recuperado de <https://tauniversity.org/sites/default/files/journal-repository/articulo-erika-prieto-aprobado-para-tau-journal-ok.pdf>.
18. SimSEE. (s.f.). Usos del SimSEE. [Mensaje de blog]. Recuperado de <https://www.simsee.org/simsee/usos.html>.
19. Vargas-Alfaro, L. (Diciembre, 2015). Trayectoria tecnológica de los mercados eléctricos en Centroamérica. *Revista de Política Económica y Desarrollo Sostenible*, 1(1), 1-25. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.15359/peds.1-1.1>.

## 14. APÉNDICES

### Apéndice 1. **Árbol del problema**



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 2. Matriz de coherencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	VARIABLES	METODOLOGÍA	PLAN DE ACCIÓN
<p><i>Pregunta principal:</i></p> <p>¿Es factible técnica y económicamente la integración de energía eléctrica generada a partir de gas natural como alternativa al sistema nacional interconectado de Guatemala?</p>	<p><i>Objetivo general:</i></p> <p>Determinar la factibilidad técnica y económica de la integración de energía eléctrica generada a partir de gas natural como alternativa al Sistema Nacional Interconectado de Guatemala.</p>	<p>Modelo de simulación Centrales generadoras que integran el SIN Potencia instalada (KW)</p>	<p>Modelo de simulación realizado en la plataforma SimSEE para realizar el estudio de factibilidad.</p> <p>Análisis de la información obtenida de la simulación realizada</p>	<p>Elaboración del modelo de simulación que proporcione información para el estudio de factibilidad de la integración de energía eléctrica generada a partir de gas natural como alternativa al SIN</p>
<p><i>Preguntas auxiliares:</i></p> <p>1. ¿Cuánta energía es aportada por centrales generadoras a partir de carbón, búnker o diésel al SIN de Guatemala?</p>	<p><i>Objetivos específicos:</i></p> <p>1. Definir cuanta energía es aportada por centrales generadoras a partir de carbón, búnker o diésel al SIN de Guatemala.</p>	<p>Energía eléctrica generada a partir de carbón, búnker o diésel (kWh) integrada en el SIN</p>	<p>Exploración bibliográfica Análisis de la información</p>	<p>Compilación de información y datos de centrales generadoras de energía eléctrica a partir de carbón, búnker o diésel instaladas en el país y su capacidad de contribución en el SIN (3 días)</p>
<p>2. ¿Existen fuentes de gas natural que permitan sustituir alguna fracción de la energía eléctrica generada a base de otros combustibles fósiles?</p>	<p>2. Determinar las fuentes de gas natural que permitan sustituir alguna fracción de la energía eléctrica generada a base de otros combustibles fósiles.</p>	<p>Cantidad de gas natural necesario para generar la misma cantidad de energía obtenida a partir de carbón (btu/ft<sup>3</sup>)</p>	<p>Exploración bibliográfica Análisis de la información</p>	<p>Recolección de datos e información sobre la cantidad de gas natural a utilizar para cubrir el aporte de la generación a partir de carbón. (4 días)</p>
<p>3. ¿Cuál es el impacto ambiental que tendría la sustitución de centrales generadoras a partir de carbón, búnker o diésel por centrales generadoras a partir de gas natural en el SIN?</p>	<p>3. Estimar el impacto ambiental que tendría la sustitución de centrales generadoras a partir de carbón, búnker o diésel por centrales generadoras a partir de gas natural en el SIN.</p>	<p>Energía eléctrica generada a partir de carbón, búnker o diésel (kWh)</p>	<p>Exploración bibliográfica Análisis de la información obtenida del modelo de simulación</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigar el porcentaje de emisión de gases de efecto invernadero que producen la generación a partir de carbón, búnker o diésel y a partir de gas natural (2 días).</li> <li>• Realizar el análisis de la información obtenida de la simulación para determinar el impacto ambiental de la generación a partir de gas natural y a partir de carbón (3 días).</li> </ul>
<p>4. ¿Cuál es el impacto económico y la rentabilidad que tendrían proyectos que integren la generación de energía eléctrica a partir de gas natural como alternativa al SIN?</p>	<p>4. Establecer el impacto económico y la rentabilidad que tendrían proyectos que integren la generación de energía eléctrica a partir de gas natural como alternativa al SIN.</p>	<p>Emisiones de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) formados por la generación a partir de carbón, búnker y diésel.</p> <p>Emisiones de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) formados por la generación a partir de gas natural.</p> <p>Energía eléctrica generada a partir de gas natural (kWh) Inversión en proyectos de generación con gas natural (\$).</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigar sobre los tipos de contratos de generación a partir de gas natural que sean viables en Guatemala (3 días).</li> <li>• Recopilar los datos obtenidos del modelo de simulación acerca de la cantidad óptima de energía eléctrica que aportará el gas natural como alternativa al SIN (2 días).</li> <li>• Realizar un análisis de la información investigada acerca de los tipos de contratos, los datos de la cantidad de energía óptima que aportará el gas natural y la proyección a corto y largo plazo realizada en el modelo de simulación (6 días).</li> </ul>

Fuente: elaboración propia.