

# Sistema de energía renovable para El Salvador

## Resumen—

El Salvador es un país que cuenta con una producción de energía principalmente a través de centrales térmicas e hidroeléctricas; sin embargo, debido al constante incremento de la demanda de energía, es necesario buscar nuevas alternativas y escenarios de producción, considerando el impacto ambiental que estas generan y el incremento en el consumo de los combustibles fósiles en el mundo. A lo largo de los últimos años, el uso de energías renovables ha ido en crecimiento gracias al desarrollo de nuevas tecnologías. Es por eso que el objetivo del presente trabajo es evaluar la posibilidad de cubrir la matriz energética de El Salvador, con fuentes exclusivamente renovables. Se realizó un análisis para evaluar económicamente distintos escenarios y lograr tal objetivo, considerando todo el potencial de recursos renovables de El Salvador. Dentro de las consideraciones generales de entradas a los escenarios evaluados, se pueden mencionar los siguientes:

- Centrales termoeléctricas, hidroeléctricas existentes en el país.
- Proyectos de expansión aprobados.
- Eficiencias de las tecnologías utilizadas.
- Costos variables y fijos por tecnología.
- Potenciales energéticos.

Generando una función objetivo considerando todas las tecnologías involucradas en el sistema energético, esta función buscó ser optimizada con el fin de obtener los resultados más favorables y viables económicamente. A continuación se describen los cinco escenarios evaluados:

1. Caso base: Creado a partir de las condiciones reales de la matriz energética de El Salvador. Sirve como base para la modelación de los demás escenarios.
2. Caso renovable: Simula la desaparición de combustibles fósiles dentro de la matriz energética, en todos los sectores de estudio, a partir del año 2020, y se incluyen proyectos, aun no aprobados, de energía renovable.
3. Caso producción libre: Se buscó simular un escenario en el cual no existan restricciones de capacidades instaladas, para que el programa sea quien decida qué y cuanto instalar de carácter renovable. Este escenario permitió identificar cuáles serían las fuentes en las que se debería invertir según su capacidad, eficiencia y costos implicados.
4. Caso GNL: este escenario fue para evaluar el impacto que tendría generar el cambio de fuel oil por gas natural como combustible en las plantas existentes en el país. En este caso se considera un costo extra de reconversión de las tecnologías para poder ser utilizadas con GNL.
5. Caso alternativo para escenario renovable: Este escenario surge a raíz del caso renovable antes descrito, ya que en él no se logra cubrir la demanda con recursos únicamente renovables. En este caso, se estudio la posibilidad de dejar las tecnologías térmicas en la simulación con el fin de suplir la demanda proyectada.

De los cinco escenarios descritos anteriormente, el más favorable resultó ser el número 3, en el cual se genera una producción libre siempre acorde al potencial existente en el país. El costo total al presente para este escenario es igual a 38, 045,100 kUS\$. Con un precio sombra promedio en el período de evaluación igual a \$0.15 por kWh, debido al impacto de los proyectos hidroeléctricos.

Massari, S., Montoya, E.;  
Sibrián, E.

Director: Aarón Martínez  
*Departamento de Ciencias  
Energéticas y Fluidicas,  
Facultad de Ingeniería y  
Arquitectura, Universidad  
Centroamericana José Simeón  
Cañas, El Salvador  
lamartinez@uca.edu.sv*

**Índice de términos—** Energía renovable, precio sombra, demanda energética, proyección.

## I. INTRODUCCIÓN

Actualmente El Salvador, consta de matriz energética suplida tanto por recursos renovables como no renovables, con el fin de incrementar o mantener esta relación, se han realizado diversos estudios para determinar el potencial renovable existente en El Salvador, siendo estos la base para el escenario renovable que se plantea en este documento. El sector eléctrico cuenta con mayor capacidad para suplir demanda con recursos renovables, siendo estos el 58% del total de energía suministrado para el año 2014; para los sectores de transporte y residencial, son principalmente abastecidos por recurso no renovables.

Los principales estudios alrededor de esta temática, abordan los diferentes potenciales de energías renovables, especialmente solar y eólica, únicamente el “Plan Maestro para el Desarrollo de las Energías Renovables de El Salvador”, orienta el totalidad la capacidad de todos los recurso de El Salvador, mas no profundiza en temas de combinación de recursos y de precios de energía, para suplir la matriz energética, ni en proyecciones sobre la demanda de la misma.

Este documento se centra en el análisis teórico de la optimización de recursos renovables, de proyectos existentes y brinda sugerencias a nuevos proyectos, con el fin de satisfacer la demanda total energética, incluyendo días laborales, días feriados y todos los sectores energéticos de El Salvador, es por esto que se presenta un análisis de los recursos energéticos renovables del país, determinando el potencial energético y brindando una combinación, económicamente viable, capaz de

satisfacer la demanda energética, durante el horizonte de estudio: 2015-2050.

Con el fin de brindar una alternativa clara para el total abastecimiento de la demanda energética, actual y futura, se plantea cuatro diferentes escenarios los cuales han sido comparados y de esta forma presentar la alternativa que brinde: el cumplimiento total de la demanda y presente un precio de mercado aceptable.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización del estudio de integración de energías renovables fue necesaria la evaluación de distintos escenarios energéticos y su evolución a lo largo del tiempo. Uno de estos escenarios se tomó como escenario de referencia (o escenario base) el cual está asociado con la evolución previsible de la energía nacional y las fuentes que la proporcionan, a partir de este, se desarrollaron escenarios de comparación los cuales incluyen nuevas tecnologías para competir con las tecnologías existentes, esto con el fin de lograr evaluar el comportamiento de los escenarios propuestos contra el escenario de referencia.

El punto de partida es la elección de un año base del cual utilizaremos el estado energético como referencia para todos los escenarios de evaluación. Una vez seleccionado el año base, fue necesaria la identificación y caracterización de los posibles escenarios a analizar. La evaluación y análisis de estos se realizaron mediante un software de simulación y modelado de escenarios energéticos basándose en los costos y beneficios que presentan las distintas tecnologías ingresadas en el programa.

### A. Planteamiento del problema

La formulación matemática del problema se basa en la minimización del valor presente de los costos involucrados en los distintos escenarios energéticos. Los costos involucrados serían representados de la siguiente forma:

$$CT = \sum (Costos_{Sector\ Electrico} + Costos_{Hidrocarburos} + Costos_{Renovables} + Costos_{Importacion})$$

Donde:

CT = Costo Total

Asimismo, los costos totales por sector, se pueden dividir en los siguientes costos específicos:

$$CT = \sum (Costos_{de\ inversion_{it}} + Costos_{Fijos\ O\ \&\ M_{it}} + Costos_{variables\ O\ \&\ M_{it}} + Externalidades_{it}) / (1 + r)^t$$

Donde:

CT = Costos Totales

i = Planta de generación o tecnología

t = Año

r = Tasa de descuento

Al hablar de tasa de descuento se refiere a la medida financiera que se aplica para determinar el valor actual de un pago futuro; en otras palabras, es la tasa que se utiliza para evaluar un proyecto de inversión.

Para el caso en estudio, la tasa se eligió como un valor intermedio entre la tasa libre de riesgo y el costo promedio

ponderado del capital utilizados para la generación de energía eléctrica en El Salvador.

**TABLA I. TASAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EL SALVADOR**

Tasa libre de riesgo	5.25%
Costo medio ponderado	11.93%
Tasa de descuento a utilizar	<b>10%</b>

Fuente: Elaboración propia, 2015

### B. Descripción del programa

MESSAGE, acrónimo de “Model for Energy Supply System Alternatives and their General Environmental impacts”, según su denominación en inglés, es un programa diseñado para la creación y optimización de modelos de sistemas de suministro de energía.

Dichos modelos pueden ser construidos a nivel nacional, subregional o regional, para la evaluación de diferentes estrategias para el desarrollo del sistema de energía del mediano al largo plazo, teniendo en cuenta las características generales de los sistemas.

MESSAGE minimiza el costo total del sistema, que puede estar sujeto a condiciones relacionadas con:

- La satisfacción de la demanda
- La capacidad de las instalaciones
- Los balances de los flujos de energía
- La disponibilidad de recursos
- Límites en la importación/exportación de energía
- Regulaciones ambientales
- Límites en la capacidad y la actividad de las tecnologías

La optimización es un método eficaz para encontrar un punto de equilibrio en el modelo de un sistema de energía. Como se describió anteriormente en el planteamiento del problema, lo que se busca es minimizar la ecuación del costo total, lo cual para MESSAGE es la función objetivo que se desea optimizar.

## C. Consideraciones generales

### 1. Horizonte de análisis

El objetivo final del estudio es evaluar numéricamente la integración de fuentes y recursos renovables para poder cubrir totalmente la demanda energética. Dicha evaluación tendría como punto inicial en el tiempo el año en curso, 2015. Se estableció una duración de 45 años para la evaluación, por lo que el período estaría comprendido entre los años 2015 y 2050. Distribuidos de la siguiente manera:

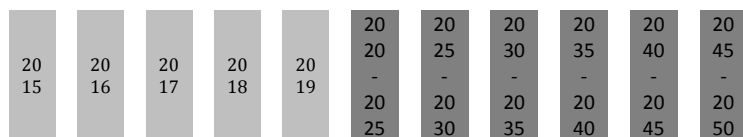


Fig. 1 Estructura del período de estudio

### 2. Regiones de carga

Para el caso de estudio en cuestión, se dividirá el año en tres temporadas. Estas temporadas fueron definidas en base a los períodos secos y lluviosos del país, los cuales coinciden a su vez, con los períodos de zafra y no zafra.

**TABLA II. TEMPORADAS DEFINIDAS EN MESSAGE**

Temporada 1	Enero - Abril
Temporada 2	Mayo - Octubre
Temporada 3	Noviembre-Diciembre

Fuente: Elaboración propia, 2015

Se definieron dos tipos de día, los cuales engloban todas las actividades normalmente realizadas y en los cuales se puede basar el análisis energético y económico que se desea realizar. Los tipos de día considerados son los siguientes:

- Días laborales: de lunes a viernes.
- Fines de semana y festivos: en este tipo se consideran los días sábado, domingo y los asuetos nacionales.

Asimismo, deben definirse bloques horarios los cuales representarán el comportamiento energético a lo largo de los tipos de día definidos. Esto se realizó de acuerdo al seccionamiento del día en resto, valle y punta utilizado en el proyecto regional de la OIEA “Fortalecimiento de capacidades para el desarrollo energético sostenible”.

**TABLA III. BLOQUES HORARIOS PARA SIMULACIÓN**

Bloque horario	Horas/día	% día
Valle	6	25%
Punta	5	21%
Resto	13	54%
<b>Total</b>	<b>24</b>	<b>100%</b>

Fuente: Elaboración propia, 2015

### 3. Distribución de curvas de carga de la demanda

Es necesario definir las curvas de carga por recurso para diferenciar los porcentajes en las que estos pueden brindar energía dentro de las regiones de carga previamente establecidas.

### D. Descripción de sectores

MESSAGE trabaja a través de niveles energéticos que ayudan a relacionar las tecnologías con el aprovechamiento de estos. Las formas de energía producidas y utilizadas en este sistema de energía se clasificaron en cuatro grupos o niveles.

- Energía primaria: se obtiene de los recursos o de la importación de energéticos, por ejemplo petróleo, gas, carbón, agua, energía solar, energía eólica, etc.
- Energía secundaria: se obtiene a partir de la energía primaria a través de procesos de conversión; por ejemplo una central hidroeléctrica produce electricidad a partir del agua. Asimismo, existen combustibles secundarios, tal es el caso del biodiesel el cual se produce a partir de aceites minerales o vegetales.
- Energía final: es la energía que se entrega a los consumidores finales. Esta se obtiene a partir de la energía secundaria mediante los procesos de transmisión, distribución y transporte. La energía en este nivel es muy similar a la del nivel secundario.
- Energía útil (demanda): esta es la representación de los servicios energéticos; por ejemplo calor, iluminación, transporte, fuerza motriz, etc.

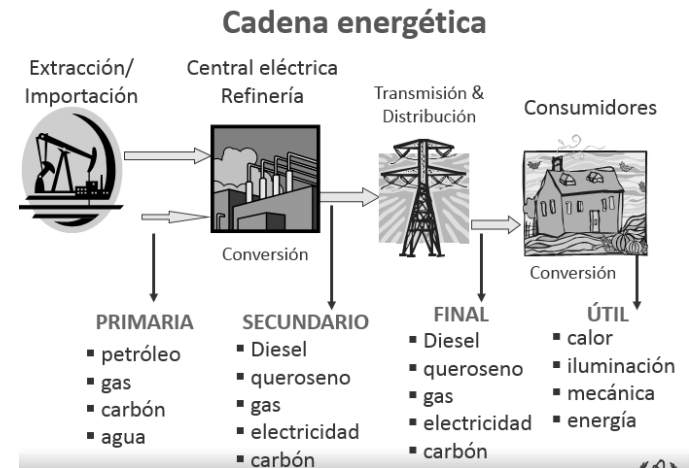


Fig. 2 Ejemplo de cadena energética ilustrada

**TABLA IV. DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA PARA SIMULACIÓN**

PRIMARIA	SECUNDARIA	FINAL	DEMANDA
	Diésel	Energía Nacional	
	Gasolina		Electricidad Residencial
Bagazo de caña	GLP		Electricidad Otros
Combustión	Carbón Vegetal		Gasolina Transporte
GNL	Fuel Oil		Diésel Transporte
Biogás	Biodiesel		Cocción
Carbón Mineral	Etanol		Calderas
	Turbo Jet		Turbo Jet
	Electricidad		

Fuente: Elaboración propia, 2015

Asimismo, se puede sectorizar la cadena de energía anterior conforme a los energéticos que se pueden observar en ella y lo que estos suplen a nivel de demanda, quedando un esquema como el que se muestra a continuación.

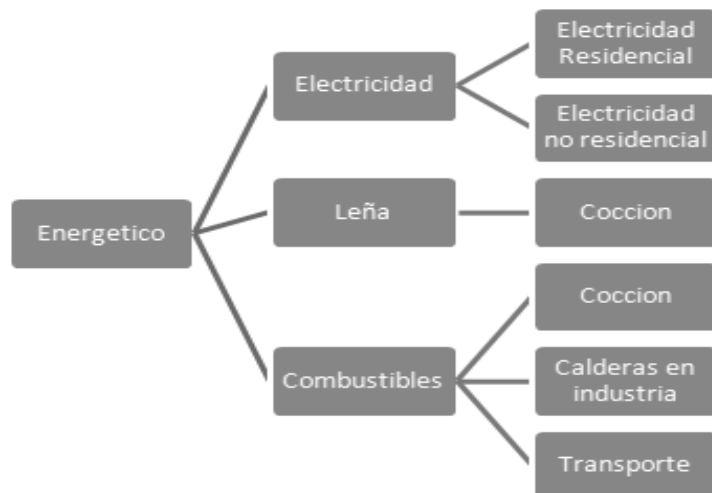


Fig. 3. Esquema de sectorización según energético

### E. Descripción de demandas

Para establecer las demandas energéticas en el país, se partió de los consumos finales presentados en el balance energético del año base. Según el documento “Metodología de Balances de Energía” presentado por la Organización Latinoamericana de Energía OLADE, metodología en la cual se basa la realización de los balances energéticos del país, el consumo final se clasifica en los siguientes sectores:

#### 1. Sector transporte

El consumo final del transporte de un país es la cantidad total de combustible requerido para mover el parque de vehículos, los cuales pueden ser: carretero, ferroviario, aéreo, fluvial y marítimo. No se incluye aquí vehículos especiales como grúas, tractores, cementeros, tanques y otros, así como tampoco consumo distinto al de vehículos tales como la electricidad consumida en los edificios de las compañías de transporte.

#### 2. Sector industrial

El consumo final del sector industrial está constituido por cualquier fuente energética empleada en los procesos que se llevan a cabo dentro de los límites del establecimiento, en el que ciertas materias primas son transformadas en productos finales. Esta definición deja de lado ciertos combustibles que las industrias compran para facilitar la entrega de sus productos al mercado; por ejemplo industrias que incluyen procesos de distribución que utilizan su propio parque vehicular, sin embargo ese consumo pertenece al sector transporte.

#### 3. Sector residencial

El consumo de este sector corresponde a los hogares urbanos y rurales del país.

### F. Modelación de la demanda

En base a lo descrito anteriormente, y en base al balance energético nacional del año base, se clasificó la demanda de la manera en la que se muestra a continuación en la siguiente tabla:

TABLA V. CLASIFICACIÓN DE DEMANDA PARA MESSAGE

Demanda	Descripción
Electricidad residencial	Se refiere al 33% del consumo final de electricidad según los balances energéticos.
Electricidad otros	Se refiere al porcentaje restante del consumo final de electricidad según los balances energéticos.
Gasolina transporte	Gasolina utilizada en vehículos automotores, esta demanda también podría ser suplida con mezcla de Etanol.
Diésel transporte	Diésel utilizado tanto por el sector público como por el sector industrial pero en el ámbito de transporte. Esta demanda podría ser sustituida por Biodiesel.
Cocción	Leña, Gas licuado propano y carbón vegetal utilizado en el sector residencial y comercial.
Calderas	Fuel Oil, Gas licuado propano y gas natural (cuando esté disponible) utilizado en el sector industrial según los balances
Turbo Jet transporte	Combustible utilizado en el sector transporte para las aeronaves.

Fuente: Elaboración propia, 2015

### G. Proyección de la demanda de energía

Debido a que la modelación se realizó con un horizonte de evaluación de 45 años a futuro, fue necesaria la realización de una proyección de demanda; es decir, como sería el comportamiento de esta con respecto al pasar de los años. Para esto fue necesaria la obtención de tasas de crecimiento anual. La clasificación de las demandas, como se mencionó anteriormente, se realizó basándose en la estructura del

balance energético nacional, por lo que para la obtención de la tasa de crecimiento anual se debió recopilar la información de consumo final de varios años previos. Sin embargo, tras el análisis de las proyecciones obtenidas solo con balances energéticos de ciertos años se llegó a la conclusión que sería mejor una comparación de tasas de crecimiento con datos históricos diversos para poder elegir el resultado más razonable, como se detalla a continuación.

La ecuación utilizada para la obtención de la tasa de crecimiento anual para todos los casos que se describirán a continuación, es la siguiente:

$$TCA = \left( \left( \frac{X_T}{X_t} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right) \times 100$$

Donde,

TCA = Tasa de Crecimiento Anual

$X_T$  = Valor del período final

$X_t$  = Valor del período inicial

m = Total de períodos comprendidos entre T y t

### 1. Proyección realizada con BEN de 2007 a 2014

Esta proyección se realizó con los datos de balances energéticos de los años 2007 a 2014, con los que se obtuvieron los datos de TCA mostrados en la siguiente tabla.

**TABLA VI. TCA PARA PROYECCIÓN DE DEMANDAS CASOS 2007-2014**

Demanda	TCA
Electricidad	1.81%
Gasolina transporte	2.07%
Diésel transporte	-1.20%
Kerosene y Turbo Jet	4.12%
Fuel Oil Industria	-9.59%
Diésel Industria	-1.20%
Gas licuado Industria	8.90%
Leña	-0.18%
Gas licuado cocción	2.57%
Carbón vegetal	-0.09%

*Fuente: Elaboración propia, 2015*

### 2. Proyección realizada con BEN de 1970 a 1996

Esta proyección se realizó con los datos históricos de balances energéticos de los años 1970 a 1996, los datos desde 1997 a 2006 se omitieron del análisis puesto que estos fueron reconstruidos posteriormente y se consideró que podría restarle veracidad a la proyección por los datos no reales. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

**TABLA VII. TCA PARA PROYECCIÓN DE DEMANDAS CASOS 1970-1996**

Demanda	TCA
Electricidad	6.57%
Gasolina transporte	4.54%
Diésel transporte	6.75%
Kerosene y Turbo Jet	5.77%
Fuel Oil Industria	3.81%
Diésel Industria	4.14%
Gas licuado Industria	9.47%
Leña	1.16%
Gas licuado cocción	9.81%
Carbón vegetal	3.18%

*Fuente: Elaboración propia, 2015*

### 3. Proyección realizada con el informe “Estudio de opciones de Mitigación de gases de efecto invernadero en el Sistema Energético de El Salvador”

Esta última proyección fue realizada en base al capítulo “Escenario energético de referencia” del estudio antes mencionado. En este capítulo se estima la evolución de la demanda energética de los sectores socioeconómicos, la dinámica de cambio de la oferta energética y las emisiones de gases de efecto invernadero; de lo anterior, nos interesa únicamente la evolución de la demanda energética. Entonces, según los datos proyectados de demanda en dicho estudio, se calcularon las TCA para cada uno de los constituyentes de la demanda antes mencionada, quedando los siguientes resultados.



TABLA VIII. TCA PARA PROYECCIÓN DE DEMANDAS

Demanda	TCA
Electricidad	4%
Gasolina Transporte	4%
Diésel Transporte	5%
Kerosene y turbo Jet	3%
Fuel oil industria	4%
Diésel industria	2%
Gas Licuado Industria	3%
Leña	-1%
Gas Licuado cocción	6%
Carbón Vegetal	4%

Fuente: Elaboración propia, 2015

Las tasas definitivas que se utilizaron para realizar las proyecciones de demanda son las que se muestran a continuación.

TABLA IX. TCA DEFINITIVAS A UTILIZAR PARA PROYECCIONES

Demanda	Informes
Electricidad	2%
Gasolina transporte	4%
Diésel transporte	5%
Kerosene y Turbo Jet	3%
Fuel Oil Industria	4%
Diésel Industria	2%
Gas licuado Industria	3%
Leña	-1%

Gas licuado cocción	6%
Carbón vegetal	4%

Fuente: Elaboración propia, 2015

Utilizando las tasas anteriores y utilizando como base para la proyección los datos presentados en el BEN correspondientes al año 2014, se obtuvieron los valores de demanda para los años del 2015 hasta 2050.

#### A. Proyección de precios de combustibles

La administración de información de energía de Estados Unidos brinda data sobre diferentes combustibles de forma anual, incluyendo precios de estos para dicho país; estos precios han sido utilizados para las proyecciones de El Salvador, se debe aclarar que no pueden ser utilizados de la forma en que EIA los presenta ya que existen variaciones como el aumento del precio por costo de internación. A continuación se describe el proceso utilizado para determinar las proyecciones de precios de combustibles.

En el reporte anual se distingue dos tipos de costos: constantes y corrientes. Los costos constantes son aquellos referidos a un año en particular, el cual se especifica en cada reporte, mientras que los costos corrientes con los valores propios del año. Debido a la dificultad de referir todos los precios a un único año y de esta forma ser comparables entre ellos, se ha optado por utilizar costos corrientes para este caso de estudio. El segundo punto a asegurar es la consistencia entre los diferentes precios de combustibles, razón por la cual los precios de fuel oil, diésel, gasolinas, gas licuado propano, carbón, kerosene turbo jet, se determinan a partir de una referencia

internacional: WTI, el cual se refiere al petróleo crudo de Texas que generalmente se utiliza como estándar para determinar el precio de petróleo en el mercado internacional; EIA brinda la proyección para WTI. A continuación se describen los pasos para determinar los precios de los combustibles antes mencionados:

#### B. Determinar relación estadística

Se busca obtener una relación de comportamiento lineal entre la variación de precios de WTI y el combustible a proyectar. Este proceso se realiza comparando el comportamiento histórico de ambos precios, según datos de EIA. Con un análisis estadístico para determinar la normalidad de los mismos y asegurar la hipótesis planteada, para esto se debe asegurar que: el valor  $p$  sea menor al 5%, el valor del error estándar sea considerablemente pequeño y el valor de  $R$  cuadrado sea cercano a uno. Dicho proceso se aplica en todos los combustibles antes mencionados.

#### C. Estimación precio FOB

Se determina la relación lineal encontrando el intercepto y la pendiente de dicha relación. De esta forma se enlaza el precio FOB del combustible a proyectar con la variación del precio de WTI. Para luego satisfacer la siguiente relación año a año:

$$Precio_{comb} = a + b * LN(WTI)$$

#### D. Precio final de combustible

Al precio FOB se suma el precio de internación, asegurando de esta forma un precio cercano a la realidad. En la tabla se muestran los diferentes costos de internación utilizados. Satisfaciendo la siguiente relación:

$$Precio_{CombES} = Precio_{comb} + Costo_{internacion}$$

Para el caso de gas natural se utiliza un método diferente haciendo uso de una Proyección internacional: Considera que el precio de Gas Natural será un porcentaje del precio del Brent, entre 8-18%. Para el caso de El Salvador se ha considerado esta proyección en las licitaciones actuales, razón por la cual se ha optado por esta opción, utilizando el 12% del valor del Brent. Para el caso de biodiesel y leña se consideran precios constantes por la falta de información de precios históricos de estos.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presenta la comparación del escenario base y las cuatro alternativas; dicha simulación presenta el abastecimiento total de la demanda de energía de El Salvador, se presentan los datos divididos según los sectores energéticos presentados en los BEN.

Para cada sector se describe el escenario base y los cambios que presentan los otros escenarios con respecto a ese y como último punto el escenario que presenta una mejor alternativa, considerando los supuestos antes planteados.

#### A. Sector eléctrico

A continuación se distribuyen los principales resultados obtenidos, dentro de los cuales se detalla:

- Generación eléctrica: Hace referencia a la inyección por recurso en GWh.

- **Distribución eléctrica:** Es la energía que suple la demanda, considerando la pérdida de las generadoras a distribución y la inyección de las plantas de transmisión, en GWh.
- **Precio sombra:** Este es el precio en dólares del kWh, dependerá de la última tecnología en entrar a abastecer la demanda, la cual es la más cara del sistema.
- **Nuevas instalaciones:** Presenta las instalaciones, en MW, de las nuevas tecnologías según los periodos anuales antes mencionados.
- **Capacidad total instalada:** La evolución de la instalación por recurso en MW, a lo largo del horizonte de estudio.
- **Función objetivo:** Esta tiene por objetivo buscar una organización del sistema energético tal que minimice el costo del mismo, sujeto a un conjunto de limitaciones.

### 1. Escenario 1

Tomando en cuenta las consideraciones antes mencionadas, se presenta a continuación la distribución de la generación eléctrica por tipo de recurso. Según MESSAGE, con las condiciones energéticas actuales, en el límite del horizonte de evaluación; es decir, en el año 2050, los recursos principales encargados de suplir la demanda son: Ingenios, GNL, hidro, Biomasa, carbón, geotérmico e importaciones. Estas últimas han sido consideradas constantes en todo el periodo de evaluación, tomando como base el dato de importaciones netas del año 2014 según la UT. Asimismo en la figura 4 se observa como el fuel oil disminuye su capacidad, siendo sustituido por otros miembros del sistema, debido a los altos costos del combustible. Los recursos hídrico, biomasa, geotérmico y las importaciones permanecen de forma constante durante el horizonte de estudio. La generación por diesel es mínima,

siendo esta la primera tecnología es desaparecer del sistema con la aparición del GNL. La generación por recurso solar es mínima y permanece vigente durante la vida útil de la planta, es decir, no se realizan nuevas instalaciones. La generación con carbón minimiza el crecimiento de GNL y desplaza al fuel oil.

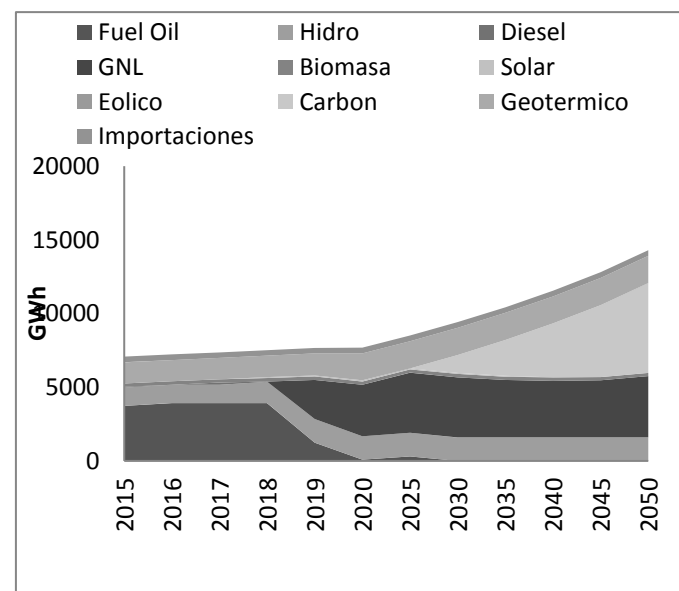


Fig. 4. Generación eléctrica de El Salvador, escenario 1.

Asimismo, el programa nos brinda la información a nivel de distribución de la energía eléctrica final. Para este nivel de distribución se toman en cuenta, además de la electricidad que es transmitida desde las plantas generadoras e importaciones, las PCHs, biogás e inyección solar, los cuales representan energía que es directamente distribuida sin sufrir las pérdidas de energía a través de la red de transmisión. El resultado según

las condiciones actuales, muestra que el 98.7% de la energía final es suplida por el mercado mayorista, mientras que PCH aporta el 0.7%, biogás el 0.5% y el recurso solar únicamente el 0.1%.

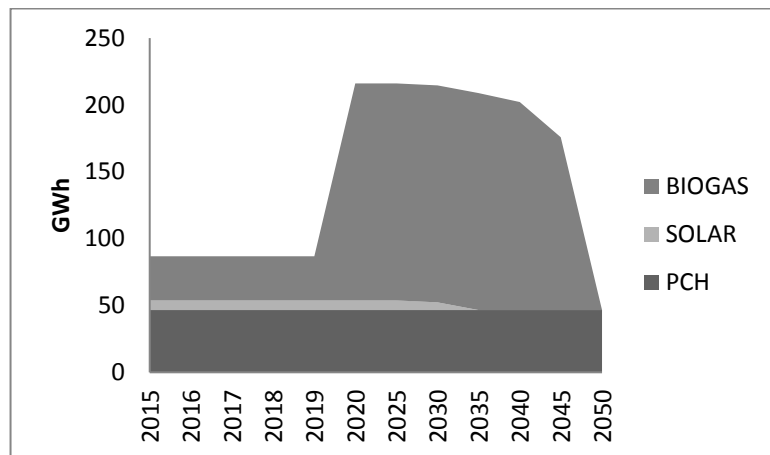


Fig. 5. Distribución eléctrica final de El Salvador mercado minorista, escenario 1

La evolución del precio de la energía se muestra a continuación en la figura 6. Se observa que generalmente presenta una tendencia creciente con el tiempo; sin embargo, en el año de ingreso del gas natural, se observa que existió una disminución bastante notoria en los precios, disminuyendo desde \$0.21 hasta \$0.14 por kWh.

En los periodos donde ingresa una nueva tecnología se obtiene un decremento en el precio sombra, tal como se observa en 2019. Cuando la nueva instalación es pequeña el precio tiene una pequeña variación, tal como ocurre en 2030.

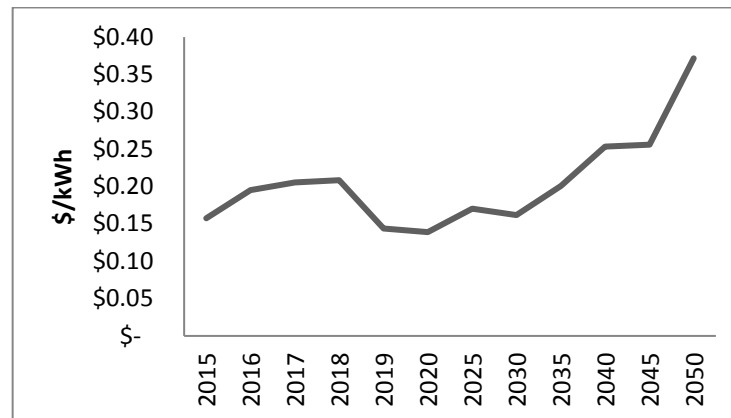


Fig. 6. Evolución del precio sombra de la energía eléctrica de El Salvador, escenario 1

Según las restricciones establecidas con respecto a los años y capacidad de las expansiones que se tomaron en cuenta, los MW instalados a lo largo del periodo de evaluación según el programa son las siguientes. Se observa que el recurso que mayor aporta capacidad instalada es el GNL.

**TABLA X. NUEVAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS, ESCENARIO 1**

	Biogas	Hidro	Solar	Geotérmica	GNL
2017	0	80	94	0	0
2018	0	65.7	0	6	380
2019	25	0	0	50	100
2020	0	0	0	0	14.8
2040	0	0	0	0	1.8
2045	0	0	0	0	20

Fuente: Elaboración propia, 2015

Con la aparición de la planta de GNL, en 2019, la capacidad eléctrica instalada aumenta un 21% con respecto al año anterior y permanece en aumento hasta el año 2025, debido a proyectos nuevos de biogás y GNL. Para el año 2035 se observan una disminución en la capacidad instalada esto se debe a que la vida útil de la planta solar, de 2015, ha llegado a su fin y GNL suple esta demanda, por lo que para el periodo 2040-2050, la energía solar desaparece del sistema. Para el caso de fuel oil a partir del 2040 presenta una disminución en su capacidad instalada, abastecida por GNL.

El recurso solar a lo largo del horizonte de estudio representa entre 0 y el 6% de la capacidad total, mostrando que esta tecnología es muy cara para competir en el mercado, bajo las condiciones actuales. El recurso geotérmico se mantiene muy constante, siendo entre el 11 y 15% de la capacidad instalada total, esto es debido a que la expansión de este recurso es cercana al 1%. El recurso hídrico sigue siendo el principal recurso renovable, la capacidad instalada de este representa entre el 30 y el 36% durante el horizonte de análisis. Las PCH, para las condiciones actuales, representan el 1% de la capacidad total instalada.

El programa MESSAGE se concentra en resolver, y sobretodo optimizar, una función objetivo la cual está sujeta a variables como costos, eficiencias, tiempos de vida, entre otras variables de entrada que el programa solicita. Por lo que la optimización de la función objetivo de este escenario, es un costo total en el presente equivalente a **38,363,100 kUS\$**.

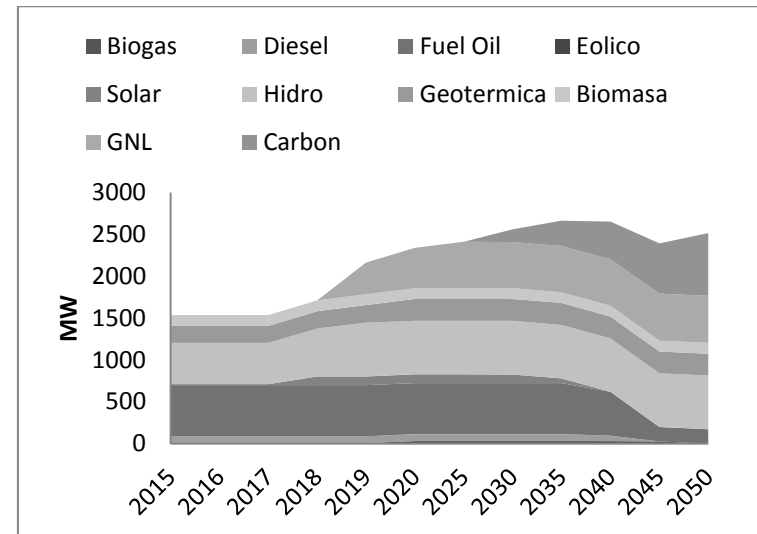


Fig. 7. Capacidad total instalada para el sector eléctrico de El Salvador, escenario 1.

## 2. Comparación de escenarios:

Se presenta una comparación económica y una comparación de recursos, mostrando las variaciones con respecto al caso base.

- Comparación económica: Como se observa en el gráfico 6.26, la curva que queda por debajo de las demás es la correspondiente al escenario 3: producción libre. En este escenario se observa que el recurso hidroeléctrico es el más rentable; asimismo, su producción fue limitada en base al potencial que, según estudios del CNE, El Salvador tiene. Esto último lo convierte en un escenario que no es irreal pues es una libertad de producción limitada bajo potenciales previamente determinados por instituciones gubernamentales especializadas en el tema.

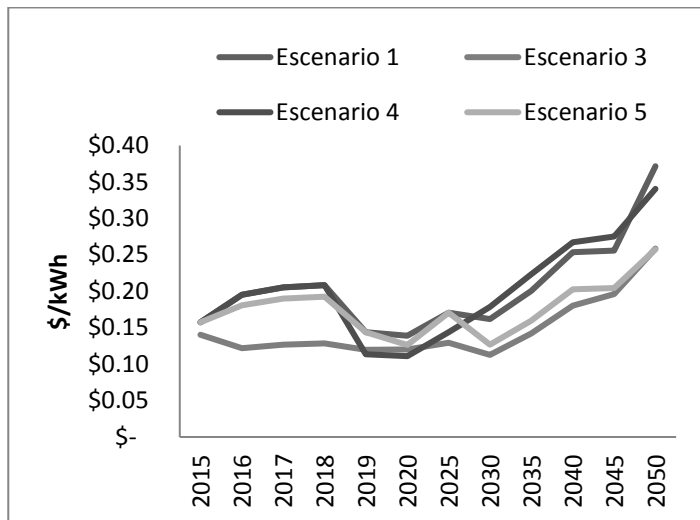


Fig. 8. Comparación del precio sombra para todos los escenarios

Asimismo, se obtuvo el costo total, es decir la optimización de la función objetivo, para cada escenario realizado. Este costo representa la cantidad de dinero en el presente que implica la inversión para poder generar la matriz energética correspondiente cada escenario.

**TABLA XI. VALORES DE FUNCIÓN OBJETIVO**

	Costo [\$ KW]
Escenario 1	\$ 38,363,100.00
Escenario 2	\$ 41,476,000.00
Escenario 3	\$ 38,045,100.00
Escenario 4	\$ 38,241,000.00
Escenario 5	\$ 38,183,800.00

Fuente: Elaboración propia, 2015

De este modo, al comparar los costos totales en miles de dólares para cada escenario, se puede observar que el escenario 3 es el más económico, concordando de esta manera con el bajo precio sombra de este con respecto a los demás escenarios.

- Comparación de recursos: En el gráfico se observa la integración de los recursos renovables y no renovables para suplir la demanda total de energía eléctrica para el año 2030, ya que a partir de este ya se cuenta periodo ya aplica las expansiones y supuestos planteados. Para las condiciones actuales el 87% de dicha demanda será suplida con recursos renovables; el único escenario 100% renovable capaz de suplir la demanda eléctrica es el escenario 3; asimismo el escenario 4 es el caso con menor aporte renovable, debido al precio del carbón que vuelven a este recurso el más adecuado para instalación.

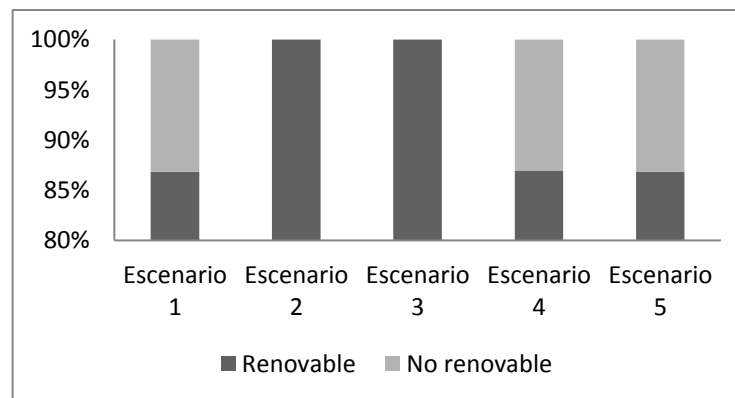


Fig. 9. Comparación de la integración de recursos para suplir demanda eléctrica

En la tabla XII se observa la evolución de la capacidad instalada año a año, comparando como cambia cada recurso por escenario, en el cual los primeros años son similares en todos ellos, debido a que estos tienen las mismas condiciones iniciales, los cambios de instalación entre ellos se deben a la optimización de la función objetivo propia de cada escenario.

**TABLA XII. NUEVAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS, TODOS LOS ESCENARIOS**

		ESCENARIOS				
Recurso		1	2	3	4	5
Mercado Mayorista	Fuel Oil	0	0	0	0	0
	Hidro	1418	3397	4980	1418	3397
	Diésel	0	0	0	0	0
	GNL	3631	1730	1232	3715	643
	Biomasa	200	200	200	200	200
	Solar	70	70	0	70	70
	Eólico	0	307	0	0	307
	Carbón	1088	0	0	1088	1088
	Geotérmico	1636	1636	1636	1636	1636
	Importaciones	339	339	339	339	339
Mercado Minorista	PCH	47	748	47	47	748
	SOLAR	6	6	0	7	6
	BIOGAS	162	162	162	162	162

Fuente: Elaboración propia, 2015

- Mejor propuesta obtenida: Tal como se observa en la sección anterior el mejor escenario, capaz de suplir la demanda proyectada y con los supuestos del caso de

estudio es: escenario 3. A continuación se presenta los detalles del mismo.

Para este escenario se considera lo siguiente:

- Todos los recursos renovables del país y sus expansiones confirmadas
- El desplazamiento de las tecnologías térmicas a partir del 2020
- La entrada del proyecto hidroeléctrico de El Cimarrón
- Posibilidad de proyectos eólicos, con límite superior de 80 MW
- Posibilidad de expansiones de PCH, con límite superior de 180 MW
- Posibilidad de expansión de recurso hídrico, con límite superior de 1800 MW
- Sistemas fotovoltaico residencial sin límite superior
- Sistema fotovoltaico conectado a red con límite superior de 550 MW

Se observa en el gráfico 6.11, que para el mercado mayorista, en el horizonte de evaluación planteado se cuenta con una gran presencia de tecnología de generación hidroeléctrica. Esta representa el 46% de toda la generación del mercado en el periodo del 2015 al 2050. La generación geotérmica permanece constante, salvo a las expansiones confirmadas, al igual que las importaciones netas de energía. Asimismo, se observa la aparición de energía fotovoltaica, sin embargo, esta corresponde únicamente al 0.4% de toda la inyección por recurso.

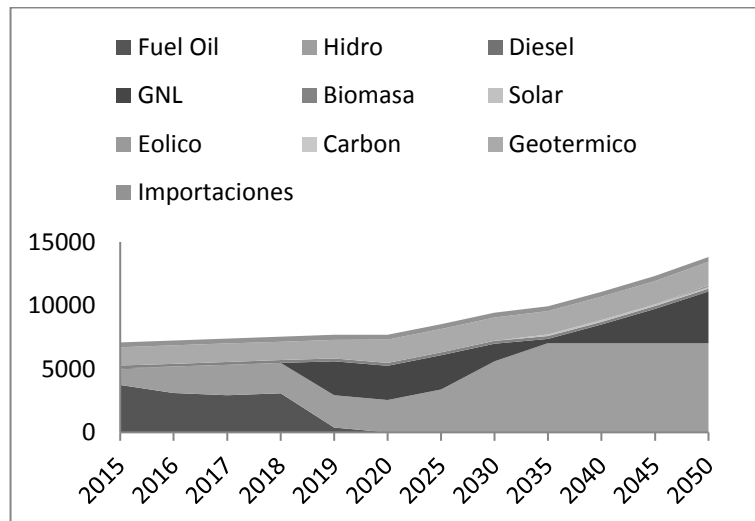


Fig. 10. Generación eléctrica de El Salvador, escenario 3

También a nivel de energía final, se observa un aumento en la producción de energía debido a las PCHs equivalente al 4.5% a partir del año 2030, como se muestra en el gráfico. Este aumento en 2030 puede deberse a la desaparición total de las plantas generadoras con fuel oil así como a los costos establecidos para esta tecnología.

Además, se observa que para este escenario la evolución del precio sombra se da con una menor tendencia de aumento que en los escenarios anteriores. Y se mantiene un promedio a lo largo del periodo de evaluación equivalente a 0.15\$ por kWh. Esto a pesar de que las generadoras térmicas se siguieron considerando como en el escenario anterior, que se dejaban de utilizar a partir del 2020.

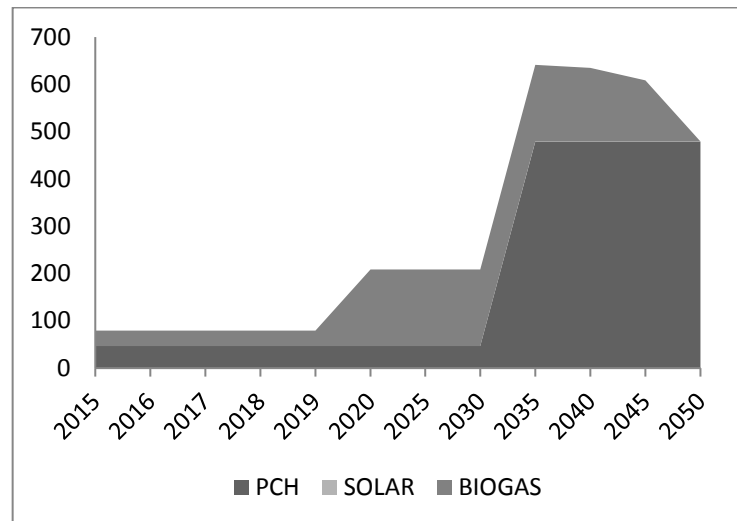


Fig. 11. Distribución eléctrica final de El Salvador mercado minorista, escenario 3

El precio sombra es poco variable durante los periodos de estudios, esto se debe a las constantes instalaciones de nuevas plantas. Los precios más bajos observados en la gráfica corresponden a los periodos donde las instalaciones son superiores.

En el gráfico de capacidad total instalada año con año, se observa la predominancia del recurso hidroeléctrico, tanto de PCHs como de hidroeléctricas conectadas a la red de transmisión.



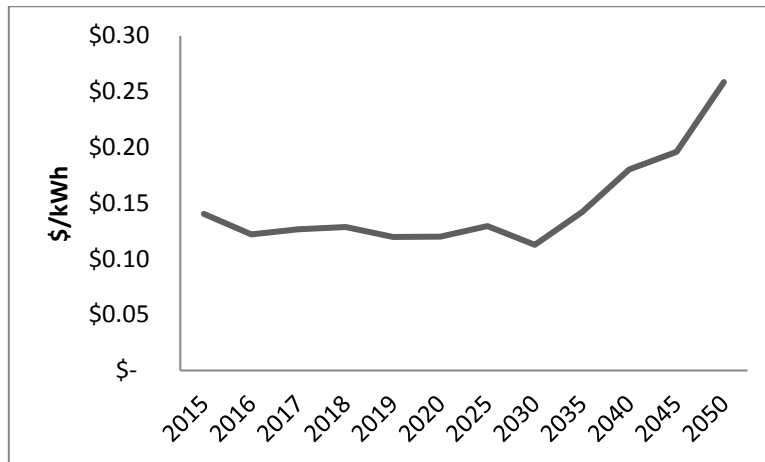


Fig. 12. Evolución del precio sombra de la energía eléctrica de El Salvador, escenario 3

**TABLA XIII. NUEVAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS, ESCENARIO 3**

	Biogas	Hidro	Solar	Geo	Eolico	GNL	PCH
2015	0	320.63	0	0		0	
2016	0	127.22	0	0		0	
2018	25	65.7	0	6		380	
2019	0	0	0	50		4.87	
2020	0	63.58	0	0		38.81	
2025	0	261	0	0		0	
2030	0	111.42	12			0	32.5
2045	0	0	107.25		16	0	

Fuente: Elaboración propia, 2015

La evolución de la capacidad instalada es creciente durante todo el periodo de análisis; el primer crecimiento importante se da a partir de la aparición del GNL, en 2019, la capacidad eléctrica instalada aumenta un 22%. Para el año 2030 se

presenta el segundo crecimiento importante, debido a la aparición de la planta El Cimarrón, instalada en 2025, siendo este igual a un aumento del 32%. El tercer cambio es el decremento de la capacidad instalada en 2045, esto se debe a las plantas térmicas llegan al fin de su vida útil, cabe aclarar que estas no generan.

El recurso solar a lo largo del horizonte de estudio representa entre 1 y el 11% de la capacidad total, mostrando que esta tecnología es muy cara para competir en el mercado, en condiciones inducidas, para este escenario el recurso solar no desaparece, pero la instalación que se realiza no es equivalente a todo el potencial existente. El recurso geotérmico fluctúa entre el 5 y 13% de la capacidad instalada total, esto es debido al importante aporte del recurso hídrico. El recurso hídrico es uno de los principales recurso renovable para suplir la demanda eléctrica, la capacidad instalada de este representa entre el 31 y el 73% durante el horizonte de análisis, excluyendo las PCH, las cuales representa entre 1 y 4%.

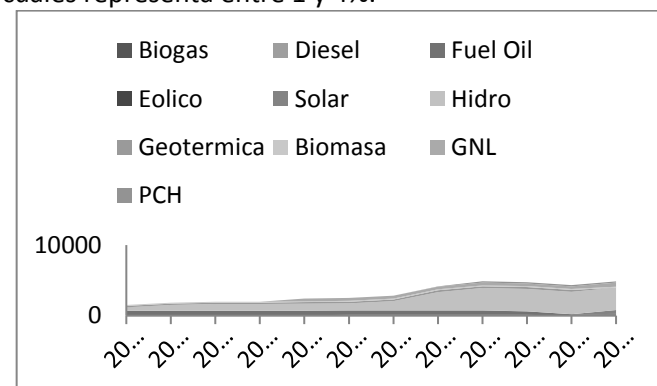


Fig. 13. Capacidad total instalada para el sector eléctrico de El Salvador, escenario 3.

Para este escenario, la optimización de la función objetivo dio como resultado un valor presente igual a **38, 045,100 kUS\$**.

## B. Sector transporte

Para el sector transporte, se tomaron en cuenta únicamente dos modelos: 1 para el escenario 1 y 4 correspondientes al caso base y reconversión de motores efectivamente, y otro para escenarios 2 y 3, correspondientes al caso renovable y producción libre.

En ambos casos, se considera como sustituto del diésel el biodiésel; y el etanol como sustituto de la gasolina.

### 1. Escenario 1 y 4

En estos escenarios, se ha considerado una participación de ambos combustibles sustitutos para suplir únicamente del 3% al 15% de la demanda de dicho combustible.

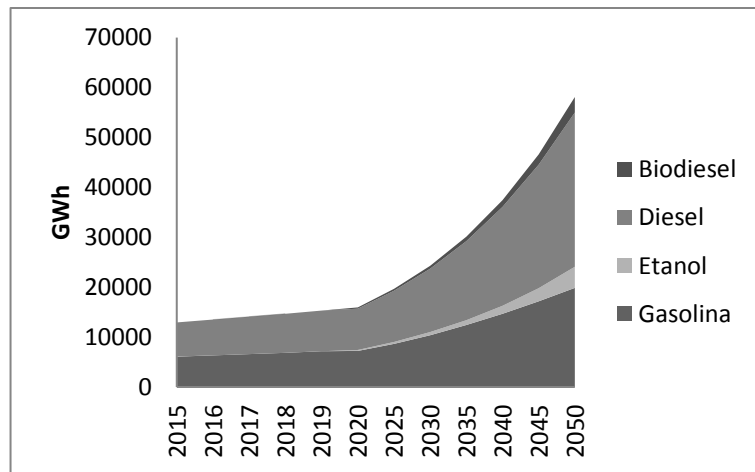


Fig. 14. Demanda de combustibles para transporte, escenario 1 y 4.

### 2. Escenario 2 y 3

Para estos escenarios se consideró que en el 2050 la demanda tanto de diésel como de gasolina podría ser suplida hasta un 45% de la demanda total de cada uno con biodiésel y mezcla de etanol respectivamente. A pesar que el diésel incluye diésel consumido en el sector industrial siempre utilizado en automotores, el 45% de la demanda cubierta por el biodiésel se tomó únicamente de la demanda ubicada en el sector transporte según el BEN. Quedando la distribución de la siguiente forma.

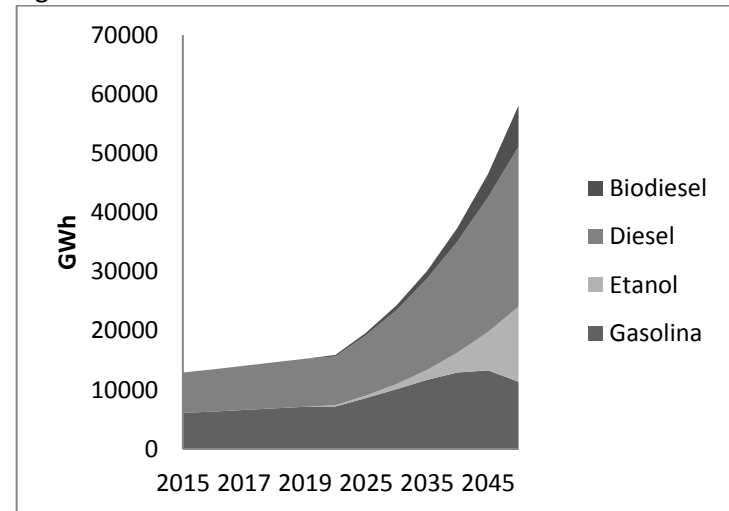


Fig. 15. Demanda de combustibles para transporte, escenario 2 y 3.

En todos los escenarios antes descritos para el sector transporte, se ha considerado que tanto el biodiésel como el etanol son importados y que ambos logran tener impacto en el consumo del país desde el año 2020 con el 3% de la demanda que se ha mencionado previamente.

### C. Sector residencial

Se utilizó la misma proyección en todos los modelos realizados. Se observa que el carbón es quien menos produce para el sector residencial, a diferencia de la leña y el gas licuado propano.

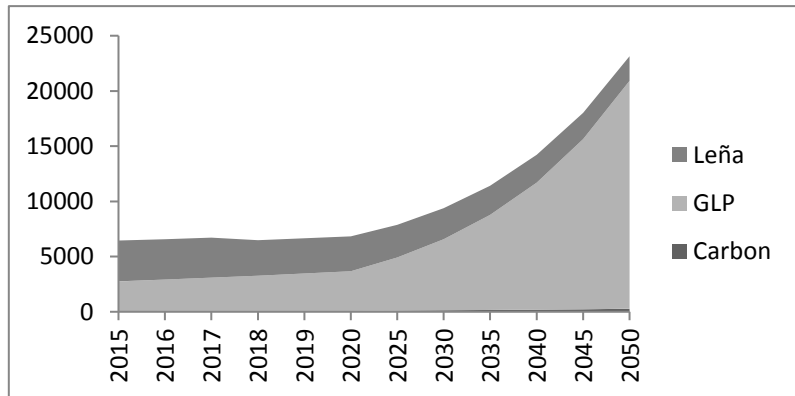


Fig. 16. Demanda de energía sector residencial.

## IV. CONCLUSIONES

- Con las condiciones actuales reales de la matriz energética de El Salvador, mostradas en el escenario 1, es posible suplir en totalidad la demanda eléctrica del país, para todo el horizonte de estudio. Ofreciendo un precio estable y razonable para cada periodo evaluado.
- De mantener las condiciones actuales con los supuestos planteados, mostradas en el escenario 1, el precio de la energía eléctrica mantendrá un aumento, presentando para el último periodo un precio para la energía que dobla el precio actual.
- Para el caso de transporte es necesaria la evaluación de otras fuentes para movilidad, ya que el diésel, gasolina y jet fuel, seguirán siendo fundamentales en este sector, aun con el ingreso de combustibles renovables.
- Los actuales proyectos renovables aprobados y los proyectos con más posibilidad de aparición, mostrados en escenario 2, no son capaces de suplir la demanda proyectada desde la desaparición del fuel oil, por lo que este escenario renovable no puede cumplirse únicamente con los proyectos aprobados a la fecha.
- Con las condiciones del escenario 2, el precio de la energía eléctrica se vuelve inestable y los valores del mismo son los más elevados para todas las simulaciones, descartando esta posibilidad de abastecimiento eléctrico.
- Para lograr obtener una matriz energética eléctrica totalmente renovable se debe considerar más proyectos de tecnología hidroeléctrica, ya que el potencial de esta complementa la demanda total, descrito en escenario 3.
- El aprovechamiento del recurso hídrico con proyectos tanto en el mercado eléctrico mayorista como minorista, refleja un impacto positivo en el precio de la energía eléctrica, mostrando un valor constante y menor que en todos los escenarios.
- El gas licuado propano representa una buena oportunidad para una sustitución renovable, ya que es el principal recurso utilizado de forma residencial para generación de calor.
- El impacto generado por la nueva planta de GNL se refleja como un aumento en la capacidad total instalada, este aumento es equivalente al 21% de la capacidad instalada del año anterior. Debido a que todos los escenarios

presentan las mismas condiciones inicialmente, este valor permanece constante para cualquier caso de estudio.

- Dentro de los recursos renovables, el recurso solar es el que menos impacto posee en el sistema renovable para El Salvador, debido al alto costo de instalación y su limitante de generación por horas, debido a esto en los escenarios su instalación se limita a los años de vida útil de la planta y evita la instalación de nuevas plantas solares. Asimismo para el caso eólico, únicamente se instala en un escenario, donde los recursos no son suficientes y se necesitan todas las tecnologías, el pobre potencial de viento de El Salvador, no permite que el costo de estos sea justificable. Por esto en los casos renovables se opta por la instalación de plantas hidroeléctricas.
- El desarrollo de proyectos de PCH e hidro, son la opción renovable más favorable, ya que el alto potencial de estas permite la instalación de diferentes plantas que juntas aportan lo necesario para suplir la demanda. El costo total de este tipo de proyecto y su alta eficiencia lo vuelve atractivo para integrar un sistema eléctrico renovable.
- Con los supuestos de precios de combustible, de inversión, evolución de la demanda y demás planteados en la investigación, la opción no renovable de plantas de carbón presenta ventajas sobre GNL, de considerarse únicamente el factor económico, es la mejor opción para generación eléctrica.
- El precio de la energía es el reflejo de la tecnología más cara dentro del sistema, por esta razón al mantener instalaciones constantes que suplan los picos de la demanda, este precio es menor y constante. Asimismo el recurso de carbón posee un impacto positivo para mantener el precio de energía bajo. Si bien este precio será

momentáneamente bajo, se puede extender este periodo, de mantener una relación entre nuevas instalaciones y aumento de demanda, evitando que esta suba y solamente pueda ser abastecida con tecnologías caras.

- La generación con fuel oil y diesel son fácilmente desplazadas por tecnologías renovables, debido al creciente precio de los combustibles, por lo cual para cualquier escenario nuevo de generación eléctrica para El Salvador, el porcentaje de generación con fuel oil y diesel será mínimo.
- Al ingresar una nueva tecnología que permita realizar más inyecciones energéticas al sistema nacional, el precio sombra de la electricidad presenta una disminución notoria. Es aquí donde radica la importancia de los proyectos de inversión en ampliaciones y expansiones para generación.

## V. REFERENCIAS

- [1] «CNE,» 2012. [En línea]. Available: [http://www.cne.gob.sv/index.php?option=com\\_content&view=article&id=116:biomasa&catid=112:renov&Itemid=198](http://www.cne.gob.sv/index.php?option=com_content&view=article&id=116:biomasa&catid=112:renov&Itemid=198). [Último acceso: Junio 2015].
- [2] N. D. O. C. Duran J, Estudio de prefactibilidad para el emplazamiento de un parqueo eolico en la costa de Teotepeque, departamento de La Libertad, Antiguo Cuscatlan, 2014.
- [3] D. d. M. Electrico, «CNE estadística,» 2014. [En línea]. Available: [http://estadisticas.cne.gob.sv/images/boletines/Boletin\\_Mercado/Resumen\\_anual\\_mercado\\_electrico\\_2014.pdf](http://estadisticas.cne.gob.sv/images/boletines/Boletin_Mercado/Resumen_anual_mercado_electrico_2014.pdf). [Último acceso: Junio 2015].
- [4] ASA, 2012. [En línea]. Available: <http://www.asociacionazucarera.net/industria.html>. [Último acceso: Julio 2015].
- [5] SIGET, 2011. [En línea]. Available: [http://estadisticas.cne.gob.sv/images/boletines/Boletines\\_SIGET/SIGET\\_2010.pdf](http://estadisticas.cne.gob.sv/images/boletines/Boletines_SIGET/SIGET_2010.pdf). [Último acceso: 3 Julio 2015].
- [6] EIA, 2015. [En línea]. “Energy Information Administration”. Available: <http://www.eia.com>. [Último acceso: 20 Julio 2015].