



**UNIVERSIDAD DON BOSCO
VICERRECTORÍA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**

**TRABAJO DE GRADUACION:
GENERACION FLEXIBLE COMO ALTERNATIVA DE
SOLUCION PARA INTEGRAR LAS ENERGIAS RENOVABLES
NO CONVENCIONALES A PARTIR DE 2020**

**PARA OPTAR AL GRADO DE:
MAESTRO EN GESTIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES**

**ASESOR:
ING. FRANCISCO ADONAY MOLINA AVILÉS, MSC.**

**PRESENTADO POR:
DANIEL ANTONIO ZEPEDA GONZÁLEZ
FERNANDO ARTURO TRUJILLO LINARES**

**Antiguo Cuscatlán, La Libertad, El Salvador, Centroamérica..
Agosto de 2017**

RESUMEN

Las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) son formas de energía cuyas fuentes no son agotables como el sol, viento, el mar, el calor de la tierra y la biomasa. La actual situación energética y medioambiental del planeta parece apuntar a que el desarrollo de nuevas tecnologías e integración de las ERNC's no ha hecho más que empezar y que las proyecciones de incorporación a la matriz energética mundial seguirá en aumento.

En El Salvador desde 1996 (se creó la Ley General de Electricidad) se busca el desarrollo de un mercado competitivo en las actividades de generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica y el libre acceso de las entidades generadoras a las instalaciones de transmisión y distribución. Con la creación del mercado eléctrico surge la necesidad de un mecanismo para casar la demanda y suministro de energía y es por ello que a partir del 2011 en El Salvador se implementó el modelo de mercado basado en costos de producción y se crea el Reglamento de Operación del Sistema de Transmisión y del Mercado Mayorista Basado en Costos de Producción (ROBCP) y se establece que los generadores de electricidad basados en fuentes de energía renovables tales como viento, sol, geotermia y biomasa tienen prioridad de despacho en el mercado eléctrico.

Y es con la incorporación de las ERNC donde se introducen nuevas variables aleatorias al sistema eléctrico nacional, ya que la dispersión en la magnitud de esta generación (debidas al recurso primario), deberá ser compensada, al igual que las variaciones de la demanda, por generación de tipo convencional.

La integración masiva de ERNC's al sistema de potencia de El Salvador (SEP), lleva a evaluar el parámetro de reserva operativa rodante (ROR) puesto que los estudios realizados por el Centro Nacional de Energía en conjunto con USAID revelaron que sin importar la potencia que se tome de base el SEP permite un 24% de recursos intermitentes sin poner en riesgo la seguridad y estabilidad del sistema.

Con el fin de contrarrestar el inconveniente de ROR y los generadores ERNC's se diseña un nuevo tipo de generadores de baja revolución o generadores flexibles, estos

generadores completaron la intermitencia de ciclado a la que obligan los generadores intermitentes, lo que significa estar arrancando y parando las unidades según la frecuencia con que los generadores ERNC's salen del sistema.

Para que una central se considere una tecnología de generación flexible, debe cumplir preferentemente con tres cualidades: Alta eficiencia eléctrica, Flexibilidad de combustible y Flexibilidad operacional. Pero desde la experiencia internacional se observa (además de los generadores flexibles) la creación de centros especializados en gestionar las energías renovables para maximizar los recursos y asegurar la estabilidad de la red eléctrica.

INDICE DE CONTENIDO

Lista de abreviaturas	4
Introducción	6
1. CAPITULO I: GENERALIDADES	
1.1 Justificación	7
1.2 Objetivos	8
1.3 Limitantes	8
1.4 Alcances	9
1.5 Metodología de Investigación.....	9
2. CAPITULO II: MARCO REFERENCIAL	
2.1 Tipos de Energía según su origen	10
2.1.1 Energías no renovables	11
2.1.2 Energías Renovables	11
2.2 Sistema Eléctrico de El Salvador	16
2.2.1 Mercado Eléctrico	16
2.2.2 Descripción del sector eléctrico	17
2.3 Despacho económico de generadores	19
2.4 Servicios Auxiliares del Mercado Eléctrico de El Salvador	22
2.4.1 Reserva Rodante	23
2.4.2 Regulación de voltaje	27
2.4.3 Contenido Armónico	28
2.4.4 Fluctuaciones de voltaje.....	29
2.5 Energías Renovables No Convencionales	30
2.5.1 ERNC en El Salvador	32
2.5.2 Naturaleza de las ERNC	34
2.6 Generación Flexible	37

CAPITULO III: IMPACTO EN LA RESERVA RODANTE DEL SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA ANTE LA INTEGRACION DE ERNC

3.1 Determinación de la ERNC Máxima a Incorporar en el SEP	40
3.2 Implicaciones de la participación máxima de ERNC	42
3.2.1 Impacto de las ERNC en el sistema eléctrico	42
3.3 Complementariedad de Generadores Flexibles y las ERNC	51

3. CAPITULO IV: ALTERNATIVAS PARA INTEGRAR LAS ERNC AL SISTEMA DE POTENCIA

3.1 Experiencia Internacional	53
3.1.1 Actualización Tecnológica	54
3.1.2 Prácticas y modelos matemáticos	56
3.1.3 Transmisión y Control	57
4.2 Generación Flexible como alternativa de integración de las ERNC's....	58
4.3 Otras alternativas de integración de las ERNC's	61
4.3.1 Almacenamiento de energía en baterías (BESS).....	61
4.3.2 Centro de Gestión Especializado en ERNCs.....	64
4.4 Marco Regulatorio	70
4.4.1 Marco Regulatorio Existente	70
4.4.2 Desafíos Regulatorios	72

1. CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFIA

79

INDICE FIGURAS

Figura 1. Matriz Energética Mundial	10
Figura 2. Sector eléctrico de El Salvador	17
Figura 3. Participantes del sector eléctrico	18
Figura 4. Estructura y Actores del Sector eléctrico	19
Figura 5. Comercialización de energía eléctrica por mercado	20
Figura 6. Categorización de proyectos ERNC	31
Figura 7. Matriz energética, 2016	32
Figura 8. Matriz energética, 2026, proyectada	33
Figura 9. Generación de Planta Solar Fotovoltaica, Antares	34
Figura 10. Curva de Probabilidad de RORs suficiente / Generación ERNC	41
Figura 11. Gráfica de Pronostico vs Demanda	43
Figura 12. Detalle Horario de Generación ERNC	44
Figura 13. Generación Planta Andes Chile	45
Figura 14. Generación horaria de centrales térmicas y ERNC	49
Figura 15. Costos de desarrollo y costos de integración	50
Figura 16. Diagrama de bloques de una Central Eléctrica Flexible	59
Figura 17. Componentes de un sistema BESS	62
Figura 18. Estructura modificada del Sistema Eléctrico y CEGER	65
Figura 19. Interacción de CEGER y generadores	66
Figura 20. Sistema eléctrico inteligente	68

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de energías renovables	12
Tabla 2. Lista de Mérito	21
Tabla 3. Corrientes armónicas	29
Tabla 4. Consecuencias de las ERNC en SEP	36
Tabla 5. Comparación de alternativas de integración	69
Tabla 6. Marco Regulatorio y desafíos de regulación	75

LISTA DE ABREVIATURAS

AC:	Corriente Alterna
AIE:	Agencia Internacional de Energia
CAG:	Control Automático de Generación
CEGER:	Centro Especializado en Gestión de Energías Renovables
CEL:	Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa
CNE:	Consejo Nacional de Energía
DC:	Corriente Directa
ENS:	Energía no Servida
ERNC:	Energías Renovables No Convencional
GWH:	Giga Watt Hora
JICA:	Agencia de Cooperación Internacional de Japón
KWH:	Kilo Watt Hora
LCOE:	Levelized Cost of Energy
LGE:	Ley General de Electricidad
MER:	Mercado Eléctrico de Referencia
MME:	Mercado Mayorista de Electricidad
MWH:	Mega Watt Hora
MRS:	Mercado Regulador del Sistema
PCH:	Pequeña Central Hidroeléctrica
RLGE:	Reglamento de la LGE
ROBCP:	Reglamento de Operación del Sistema de Transmisión y del Mercado Mayorista Basado en Costos de Producción
ROR:	Reserva Operativa Rodante
RP:	Regulación Primaria de Frecuencia
RS:	Regulación Secundaria

SAE:	Sistema de Administración de Energía
SEP:	Sistema Eléctrico de Potencia
SFV:	Solar Foto Voltaico
SIGET:	Super Intendencia de Electricidad y Telecomunicaciones
SING:	Sistema Integrado de Norte Grande de Chile
SEP:	Sistema Eléctrico de Potencia
UT:	Unidad de Transacciones
UTR:	Unidad Terminal Remota

INTRODUCCIÓN.

La combinación del efecto de los combustibles fósiles y el cambio climático se convirtió en el panorama perfecto para que el mundo se decidiera a desarrollar nuevas tecnologías de generación e investigar nuevas fuentes de energía. En este sentido las energías renovables cobraron un protagonismo único en la historia de la generación de electricidad buscando en largo plazo la reducción o en algunos casos el desplazamiento casi total de los derivados del petróleo.

Al conocer la inagotable energía que proviene de fuentes renovables como el sol y el viento se visualizó un claro horizonte de desarrollo y una oportunidad de incorporar el máximo posible de estas energías a los sistemas de potencia en detrimento de los generadores térmicos, pero las condiciones climáticas y variabilidad de estas nuevas fuentes incorporó al sistema eléctrico de potencia (SEP) una intermitencia que volvió más difícil que la producción de electricidad siguiera a la demanda; esta variación obligó a los sistemas eléctricos a evolucionar y convertirse en sistemas flexibles capaces de incorporar la variabilidad de las ERNC y asegurar la calidad del suministro de energía eléctrica en condiciones normales, así como soportar las condiciones extremas como el caso de una contingencia al perder una unidad de generación, lo que se torna crítico especialmente cuando ya existen niveles de penetración relevantes de las ERNC's.

En El Salvador el sistema de potencia se encuentra en la etapa de integrar las ERNC's y para que el sistema sea capaz de integrar de forma eficiente estas energías, es inminente evolucionar el sistema para alcanzar niveles de penetración altos en la relación a la potencia firme disponible en el país.

I. GENERALIDADES

1.1 Justificación

Bajo el punto de vista de la seguridad de suministro de electricidad, las nuevas fuentes para generación permiten diversificar la matriz energética actual, fuertemente basado en generación hidroeléctrica (31%, 472 MW¹) y, por lo tanto, vulnerable a los fenómenos climáticos tales como El Niño/La Niña.

Además, la indeterminación de las políticas de concesión de permisos para la construcción de nuevas centrales hidroeléctricas, combinada con la creciente capacidad de influencia y bloqueo de grupos opositores a la construcción de embalses, ha resultado en retrasos en la construcción de estas plantas, lo que ha afectado la fiabilidad de suministro, como ejemplo ver el caso de la presa El Chaparral².

En contraste, las energías renovables no convencionales (ERNC) son proyectos de menor escala, geográficamente distribuidos, sujetos a menores obstáculos a la hora de obtener licencias ambientales y que permiten diversificar la matriz energética. Adicionalmente, el tiempo de construcción de estas fuentes (18-24 meses) es mucho menor que los cinco a siete años que como mínimo se necesitan para completar un proyecto hidroeléctrico. Esto permite una mayor flexibilidad en la entrada de nueva capacidad, lo que es un atributo importante debido a la incertidumbre en el crecimiento de la demanda. Al tiempo, también son una solución atractiva para el acceso a la electricidad en poblaciones aisladas.

La matriz energética nacional se ha diversificado en los últimos años, principalmente con la generación fotovoltaica y se espera seguir integrando este tipo de energía y adicionalmente, a partir del 2017 energía eólica. Estos tipos de tecnología de generación cuya producción es variable y solo parcialmente predecible, y que tiene costos variables de operación iguales a cero, se ha incorporado a un sistema en el que la generación y una demanda que varía en el tiempo tienen que estar en continuo equilibrio. Cuando se dan altos niveles de penetración de fuentes variables, las características globales del sistema eléctrico pueden verse alteradas de manera significativa. Estos cambios tienen que ser considerados y acomodados en los

¹ Según información de www.cne.gob.sv

² Proyecto que inicio en el 2007, fue suspendido por diversos factores y recientemente se adjudicó la obra para concluir en el 2017, fuente www.cel.gob.sv

procesos de operación y planificación, puesto que, no fueron diseñados para incorporar grandes cantidades de generación intermitente.

La diversificación de la matriz energética con tecnologías de generación no convencional, tendrá que ser capaz de integrar una alta penetración de recursos intermitentes y gestionar un mayor grado de ciclado de las unidades térmicas, menos horas de utilización y un cambio en el patrón de los precios del mercado. Por tal razón, se deben visualizar opciones de solución para estabilizar el sistema de potencia y, es en este punto donde la generación flexible se presenta como alternativa de solución para ser considerada en el mediano plazo.

1.2 Objetivos

a. Objetivo General

Presentar la generación flexible como alternativa de solución para contrarrestar el efecto de integración de las Energías Renovables Variables sobre el sistema de potencia de El Salvador a partir del 2020.

b. Objetivos Específicos

- Describir el impacto en la reserva rodante del sistema eléctrico de potencia ante la integración de energías renovables no convencionales.
- Presentar las alternativas para integrar las energías renovables no convencionales al sistema de potencia de El Salvador.

1.3 Limitantes

Basados en la descripción del impacto de las Energías Renovables No Convencionales en el sistema eléctrico de potencia, la investigación se enfocará en la reserva rodante, no se incluirán la proyección, el análisis de las políticas energéticas y los incentivos para el desarrollo de las energías renovables en El Salvador para el 2020.

Para la presentación de la generación flexible como alternativa de solución a la intermitencia de las ERNC's, no se tendrá en cuenta la red de transmisión eléctrica en ninguna de las etapas

de estudio considerando que la potencia de los generadores flexibles es considerada como reserva fría.

Se considera como modificación a la matriz energética, la capacidad proyectada de energías intermitentes según licitación de 170 MW de energía eólica y solar fotovoltaica realizada en el año 2016.

1.4 Alcances

Se tomará en consideración la matriz energética proyectada al año 2020 según el plan maestro para el desarrollo de las energías renovables.

La generación flexible se presentara como alternativa de solución propuesta desde una perspectiva descriptiva y como reserva fría del sistema.

1.5 Metodología Explicativa

Para la realización de la investigación se utilizará el tipo de investigación explicativa, ya que, se constituirá un conjunto organizado de afirmaciones y estudios por medio de los cuales se interpretará el comportamiento del sistema de potencia, el efecto de la integración masiva de ERNC y se incluirá además, los aspectos relevantes de la generación flexible tales como: definiciones, terminología, forma de implementación (basado en los modelos de países de la región y europeos), ventajas y desventajas que presenta la generación flexible; para finalmente plantear la generación flexible como solución para equilibrar el sistema de potencia afectado por la intermitencia de los recursos renovables solar y eólico.

II. MARCO REFERENCIA

2.1 Tipos de Energías según su origen

La energía es la fuerza motriz que hay tras la productividad, la calidad y una vida cómoda. La energía es por lo tanto el motor de la economía. La energía se suministra cada vez más a los usuarios finales en forma de energía eléctrica, ya que la electricidad es muy versátil. El suministro de energía debe ser sostenible, con efectos aceptables a corto y largo plazo sobre el medio ambiente.

Bajo este propósito la matriz energética mundial está cambiando, desplazando poco a poco a los combustibles fósiles con el fin de disminuir emisiones de gases que causan el efecto invernadero. Aun así, en el 2014 el 66.7%³ de la producción de electricidad en el mundo fue de combustibles fósiles, pero ya se incluyen otros tipos de energías.

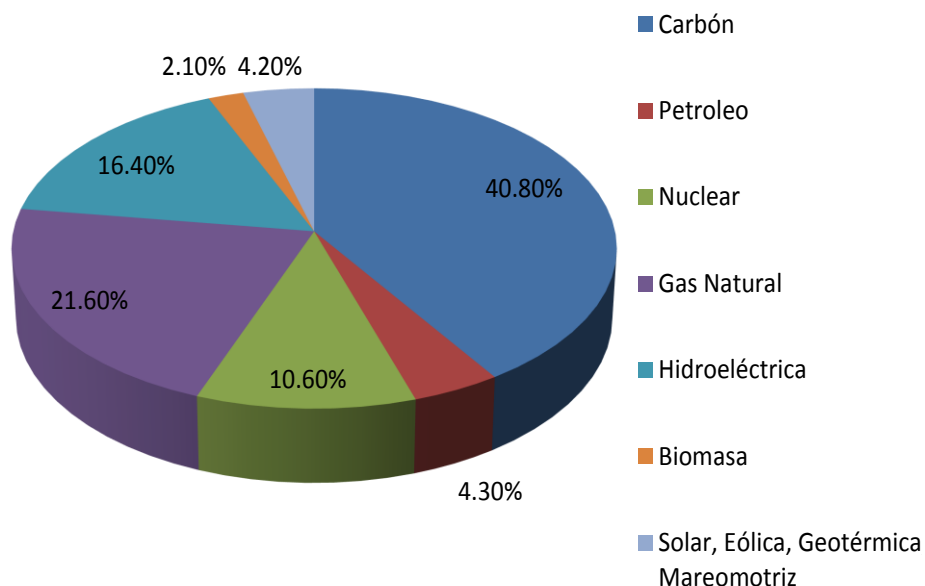


Figura 1. Matriz Energética Mundial.
Fuente, Agencia Internacional de Energía.

³ Agencia Internacional de Energía, Estadísticas 2014

Podemos observar dos grandes grupos de combustibles utilizados según la fuente para producción de energía eléctrica:

- Energías no renovables
- Energías renovables

2.1.1 Energías no renovables.

La Energía no renovable o convencional, se refiere a aquellas fuentes de energía que se encuentran en la naturaleza en una cantidad limitada y una vez consumidas en su totalidad, no pueden sustituirse, ya que no existe sistema de producción o extracción viable. De este tipo de energías existen dos clasificaciones:

- a. **Combustibles fósiles.** Son combustibles fósiles el carbón, el petróleo y el gas natural. Proviene de la biomasa de hace millones de años, que bajo condiciones adecuadas de presión y temperatura se convirtieron en sustancias dotadas de propiedades energéticas
- b. **Combustibles nucleares.** Los combustibles nucleares pueden ser el uranio, el plutonio y, en general, todos los elementos químicos fisibles adecuados para la operación de reactores (se trata de elementos capaces de producir energía por fisión nuclear). La energía nuclear se utiliza para generar electricidad en centrales nucleares. El procedimiento de producción es muy semejante al que se emplea en las centrales termoeléctricas. Difiere en que el calor no se genera por combustión, sino mediante fisión de materiales. En rigor, no son combustibles, sino energéticos.

2.1.2 Energías renovables

Las energías renovables proceden de fuentes naturales que son inagotables. Las energías renovables tienen menos emisiones de carbono, reciclan y son más respetuosas con el medio ambiente en relación a los efectos contaminantes de combustibles fósiles como el petróleo o el carbón. La energía renovable es flexible porque puede ser usada en pequeños sistemas de generación distribuida o en grandes instalaciones para generación centralizada o en cualquier tamaño intermedio. Por supuesto, los combustibles fósiles pueden ser utilizados en cualquier tipo de sistemas también, en virtud que existen generadores portátiles pero no hay interés a

pequeña escala en energizar residencias usando plantas de generación debido al costo, el ruido y el olor.

Las energías renovables son todas aquellas procedentes de una fuente natural, por lo que se consideran recursos limpios y casi inagotables.

En la siguiente tabla se presenta una clasificación según la fuente de origen.

Ítem	Fuente	Tipo de Energía
I	El Sol	Solar Fotovoltaica
		Solar Térmica
ii	Agua de ríos y corrientes de agua dulce	Hidroeléctricas
		PCH's
iii	Océano	Corrientes
		Undimotriz
iv	Calor de la Tierra	Geotérmica
V	Viento	Eólica
vi	Desechos orgánicos (Biomasa)	Biocombustibles

Tabla 1. Tipos de energías renovables.

Fuente, Elaboración propia.

Se pueden observar nueve tipos de energía renovable que corresponden a seis fuentes consideradas inagotables y limpias. A continuación se describirán brevemente las energías renovables de aplicación eléctrica y en que consiste cada una de ellas.

i. Energía Solar

La energía solar es la producida por la radiación solar, el aprovechamiento de la luz genera energía fotovoltaica por medio de paneles solares y, el aprovechamiento del calor produce energía termosolar auxiliándose de colectores solares.

Cada segundo, el Sol irradia, en todas las direcciones del espacio, una energía igual a 4×10^{26} Joules, en términos de potencia equivale a generar 4×10^{23} kilovatios. La cifra anterior en

términos de generación, sería el comparar la potencia generada por todas las plantas industriales del mundo, trabajando al unísono, y aun así serían trescientos billones de veces más pequeñas que la del sol en un segundo.

Se conocen dos clasificaciones para la obtención de electricidad por medio de energía solar:

- a) **Energía Solar fotovoltaica:** se obtiene por el efecto fotovoltaico de ciertos materiales que reaccionan ante la radiación solar, es por medio de las células solares fotovoltaicas que se convierte la luz del sol directamente en electricidad por el llamado efecto fotoeléctrico, por el cual determinados materiales son capaces de absorber fotones (partículas lumínicas) y liberar electrones, esto genera una corriente eléctrica directa (DC) la cual se transforma por medio de unos inversores en corriente alterna, según la necesidad y del diseño de la instalación, puede ser almacenada en baterías o ser inyectada a red, otra aplicación muy común es que se utiliza como generación aislada (autoconsumo). En El Salvador existen muchos sistemas instalados la mayoría son sistemas aislados con bancos de baterías y una cantidad limitada de generadores para autoconsumo conectados a la red. La potencia instalada es 10.6 MW⁴ de los cuales la mayoría están instalados en edificios gubernamentales, colegios, escuelas y universidades.

Se desarrolló una licitación dirigida a nuevos proyectos de generación ERNC a pequeña escala, se adjudicaron 28 proyectos fotovoltaicos adicional con una capacidad de 11.2 MW.

Además, en el 2016 se inicia adjudicaron un total de 120 MW⁵ en proyectos de gran escala, con número de licitación DELSUR-CLP-RNV-1-2016.

En mayo del 2017 fue inaugurado el proyecto Providencia Solar, compuesto por las plantas Antares y Spica, con una capacidad instalada de 101 MW⁶, los cuales ya forman parte de la matriz energética nacional.

⁴ Potencia instalada al 2016, fuente energiasrenovables.cne.gob.sv

⁵ Fuente: <http://www.delsur.com.sv/licitacion170mw>

⁶ Artículo sobre Providencia Solar, <http://energiasrenovables.cne.gob.sv/>

b) Energía Solar Térmica: utiliza la radiación solar en forma directa por medio de colectores solares térmicos, estos absorben y concentran el calor solar, el cual transferirlo a un fluido y conducido por tuberías para su aprovechamiento en edificios e instalaciones o también para generar vapor y accionar una turbina generadora de electricidad (solar termoeléctrica).

ii. Energía Hidroeléctrica

Se denomina energía hidráulica o energía hídrica a aquella que se obtiene del aprovechamiento de las energías cinética y potencial de la corriente del agua, saltos de agua o mareas.

Durante el período de lluvia, cuando el recurso de agua es abundante, la energía producida por las centrales hidroeléctricas es inyectada a la red antes que la energía proveniente de los otros recursos, ya que, tiene un costo de generación más barato. Sin embargo, durante el período de escasez de agua, como en la época seca, el déficit de energía eléctrica es cubierto por las centrales que utilizan derivados de petróleo y otros recursos más costosos.

En El Salvador se distinguen 4 represas para generación de electricidad utilizando el cauce del Río Lempa, ya que es el río más grande y el más atractivo para la explotación de los recursos hidráulicos en El Salvador. La capacidad nominal de las cuatro presas totaliza 397 MW, además, para el año 2016 se pueden contabilizar un total de 23⁷ pequeñas centrales hidroeléctricas con una capacidad instalada total de 24.9 MW, de las cuales ninguna supera los 3 MW de potencia.

iii. Energía Del Mar

Energía que aprovecha la energía cinética de los mares y océanos. Según sea que aproveche las olas se denomina undimotriz, o mareomotriz si proviene de las mareas, también se trabaja en la energía de los gradientes de temperatura entre el fondo y superficie del océano. La energía de las mareas aprovecha las diferencias de altura entre la altura media de los mares según la posición relativa de la tierra y la luna, a veces estas diferencias de altura pueden llegar ser de metros. Se usa un alternador para generar energía eléctrica

⁷ Fuente: <http://www.energiasrenovables.cne.gob.sv/>

iv. Energía Geotérmica

Es la energía almacenada en forma de calor en reservorios geotérmicos, se obtiene a través de pozos perforados para sustraer la energía almacenada en el fluido geotérmico.

La generación eléctrica aprovechando la energía geotérmica en El Salvador se inició en 1975 y ha aumentado de manera constante desde entonces. Este tipo de generación, participante del mercado mayorista, cuenta con una capacidad instalada actual (2012) de 204.4 MW⁸. LaGeo SA de CV es la única empresa encargada del desarrollo de la geotermia en el país.

v. Energía Eólica

Se obtiene a partir de la fuerza del viento y que se transforma en electricidad mediante turbinas de viento y que se disponen en lo que se conocen como parques eólicos. En este tipo de energía, el viento da vueltas en las palas de las turbinas que giran y que están conectadas a un generador que produce electricidad.

En el 2016 se adjudicó el primer parque eólico de El Salvador con capacidad de 50MW, según licitación DELSUR-CLP-RNV-1-2016.

vi. Energía de Biomasa

Se obtiene a partir de los gases que se generan a través de la fracción biodegradable de los residuos de origen biológico (vegetal y animal), o de residuos ya sean industriales o municipales. Mediante diferentes procesos puede ser purificado hasta alcanzar una calidad que se asemeja a la del gas natural, y puede ser usado como combustible, biocarburante o gas de madera.

La generación de energía eléctrica a partir de biomasa puede realizarse de distintas maneras:

- a. Centrales de biomasa, generadoras de biogás, para la producción exclusiva de electricidad [MIDES]
- b. Centrales de cogeneración de biomasa que producen electricidad y calor.
- c. Centrales térmicas convencionales (de co-combustión), en las que la biomasa sustituye parte del combustible fósil [Generación Flexible].

⁸ Datos tomados del Consejo Nacional de Energía, www.cne.gob.sv

En El Salvador la caña de azúcar es el recurso agrícola que tiene mayor potencial y mayor capacidad para generar energía eléctrica a partir del bagazo, el cual puede crecer y evolucionar más a través de aumentar la eficiencia en el aprovechamiento de estos recursos para la producción de electricidad. En el Plan Maestro para el desarrollo de las energías renovables se evaluó adicionalmente el potencial de la cáscara de café y la cáscara de arroz en donde se estimó valores indicativos de aprovechamiento energético de estos recursos naturales.

2.2 Sistema Eléctrico de El Salvador

2.2.1 Mercado Eléctrico

Por las condiciones dadas en 1996 el mercado eléctrico de El Salvador se reestructura, y se crea la Ley General de Electricidad (LGE) la cual tiene como objetivos:

- a) El desarrollo de un mercado competitivo en las actividades de generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica.
- b) Libre acceso de las entidades generadoras a las instalaciones de transmisión y distribución.

La LGE transformo el sector y llevó a la creación de un mercado eléctrico en El Salvador. La LGE establece en su artículo 119 que la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Rio Lempa (CEL) deberá reestructurarse a efecto que las actividades de mantenimiento del sistema de transmisión y operación del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) sean realizadas por entidades independientes y que las de generación se realicen por el mayor número posible de operadores. Esta reestructuración conformo el sector eléctrico de la siguiente manera:

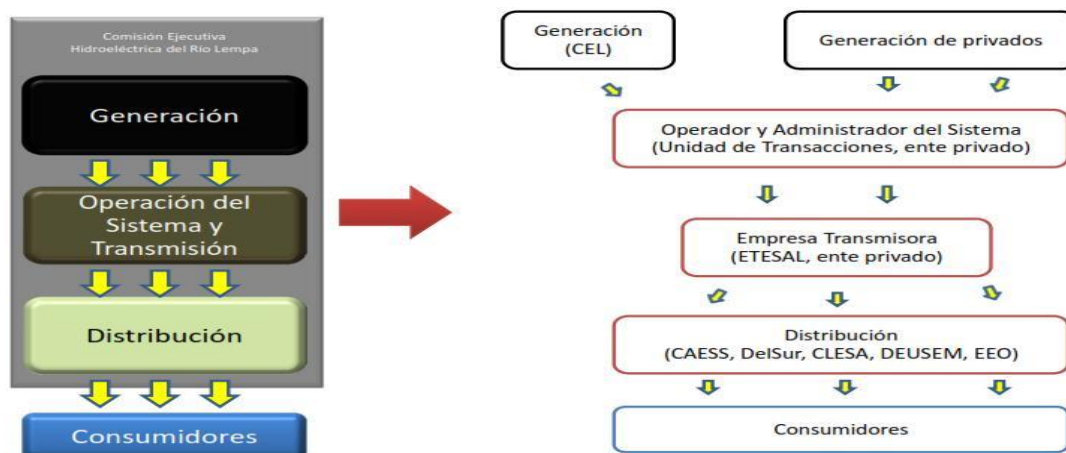


Figura 2. Sector eléctrico de El Salvador

Fuente, Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa.

2.2.2 Descripción del Sector Eléctrico

El sector eléctrico de El Salvador está compuesto por distintos agentes los cuales conjuntamente integran el Mercado Mayorista de Energía. Estos agentes pueden ser de características públicas o privadas y que tienen funciones específicas en un mercado con reglas bien definidas.

Entre los agentes antes mencionados podemos resaltar:

EMPRESAS GENERADORAS, las cuales poseen las centrales de producción de energía eléctrica y la comercializan en forma total o parcial.

AGENTE TRANSMISOR. Es la entidad poseedora de instalaciones destinadas al transporte de energía eléctrica en redes de alto voltaje. Esta es una sola empresa de figura pública-privada, ya que a este nivel de mercado la competencia no es factible.

EMPRESAS DISTRIBUIDORAS. Son las poseedoras y operadoras de las instalaciones de distribución. Su finalidad es transformar la energía de un nivel de voltaje mayor a uno adecuado para los usuarios finales en sus redes de suministro.

COMERCIALIZADOR DE ENERGÍA ELÉCTRICA. Estos agentes hacen transacciones de compra venta de energía a nivel regional para satisfacer demandas de algunos otros agentes, como los usuarios finales. Los Comercializadores también están sujetos al Reglamento del Mercado Regional de Electricidad entre los países centroamericanos, así como a la normativa nacional.

Finalmente para que exista una coordinación entre los agentes se requiere la participación de un **OPERADOR DEL MERCADO**, que ejecuta las acciones necesarias y realiza las conciliaciones económicas que resultan de las transacciones entre agentes.

De la misma manera el **ENTE REGULADOR** tiene las funciones de aplicar normas y reglamentos que establezcan reglas claras para el buen funcionamiento del mercado.

La figura muestra a los principales participantes del sector eléctrico.

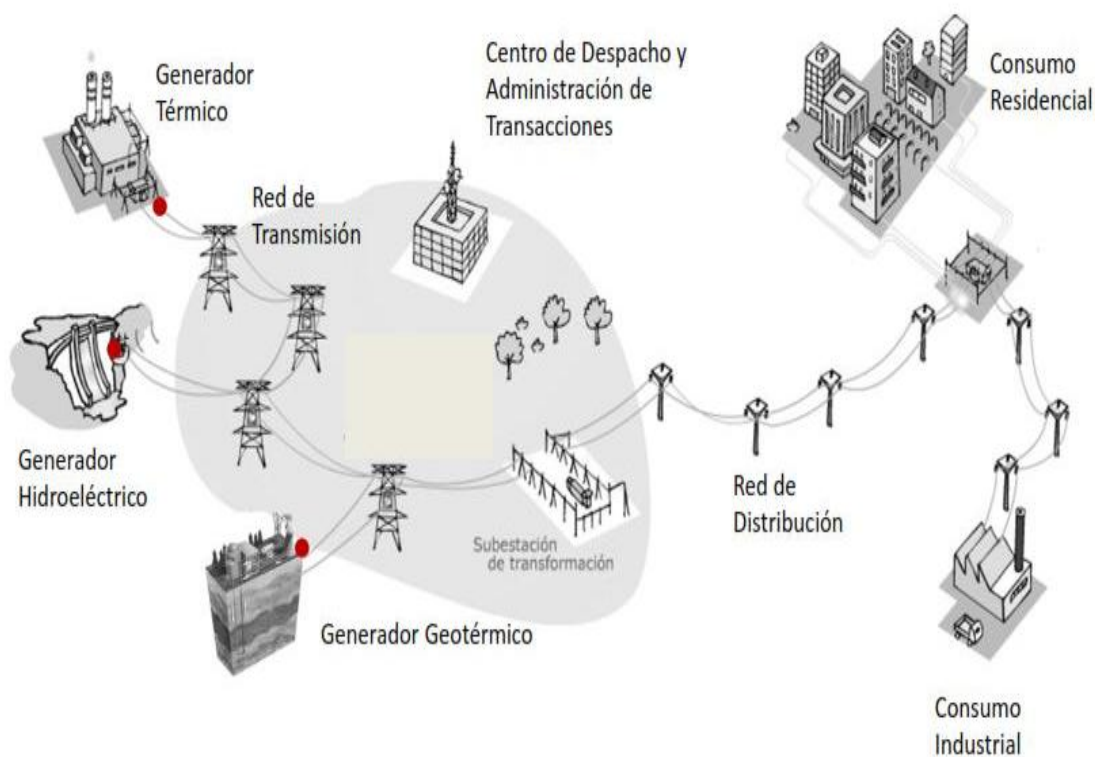


Figura 3. Participantes del sector eléctrico

Fuente, Material académico proporcionado en MGER

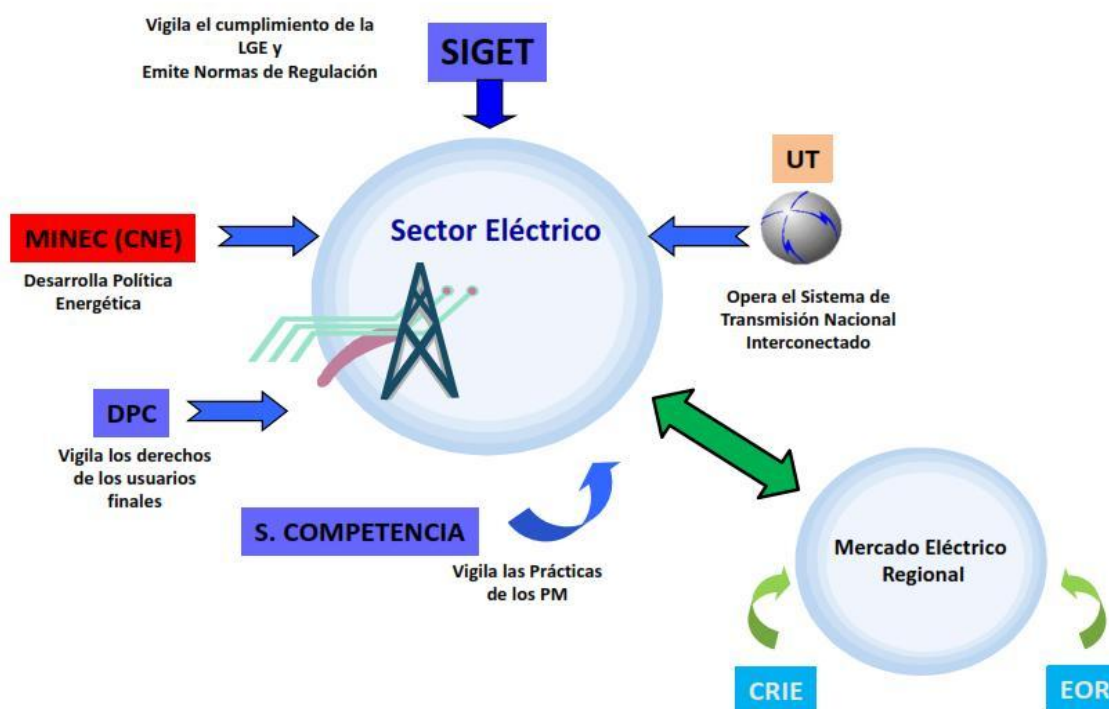


Figura 4. Estructura y Actores del Sector eléctrico.
Fuente, Material académico proporcionado en MGER.

2.3 Despacho Económico de Generadores

A partir de la creación del mercado eléctrico surgió la necesidad de contar con un mecanismo para casar la demanda con el suministro de energía y contar con un precio de equilibrio de las comercializaciones, es por ello que a partir del 2011 en El Salvador se implementó el modelo de mercado basado en costos de producción, donde cada generador tiene un costo de producción verificado y auditado. Con esta figura de costos se crea el Reglamento de Operación del Sistema de Transmisión y del Mercado Mayorista Basado en Costos de Producción (ROBCP), el cual fue aprobado en julio del año 2009⁹. El despacho de generación se realiza en base a dichos costos.

⁹ Aprobado mediante el Acuerdo No.232-E-2008 del 23 de octubre de 2008, publicado por primera vez en el Diario Oficial No. 144, Tomo No. 384, del 31 de julio de 2009

Existe una curva de oferta, la cual se construye en base a los costos de producción para que los precios que se cobren reflejen realmente los costos de producir la energía.

Para casar la oferta con la demanda se elabora la lista de mérito donde los generadores se clasifican por sus costos de producción, iniciando con los costos menores hasta los que tienen los mayores costos de producción, la última unidad que entra para cubrir la demanda se nombra como unidad marginal, y esta define el costo marginal.

El costo marginal del sistema es determinado por el costo variable de la última unidad necesaria para cubrir la demanda. La unidad marginal puede ser una unidad térmica, geotérmica, hidroeléctrica, cogenerador, auto productor, no convencional, importación o la unidad de racionamiento forzado. El costo marginal del sistema será pagado a todos los generadores que inyecten energía al mercado Spot o MRS. En El Salvador solo el 30% aproximadamente se comercializa en este mercado, el 70% restante se negocia en el mercado de contratos, tal como se muestra en la figura 5.

Los generadores de electricidad basados en fuentes de energía renovables tales como viento, sol, geotermia y biomasa tienen prioridad de despacho en el mercado MRS, pero en el caso de los generadores fotovoltaicos su salida de la red depende en gran medida del tiempo y la hora del día, además, su producción nunca es completamente predecible y a veces es incluso cerca de cero.



Figura 5. Comercialización de energía eléctrica por mercado.

Fuente, boletín estadístico UT, abril 2017.

Lista de Mérito - 2017.05.08. GPO-RSGC004			
FECHA	COD_EQUIPO	CVARIABLE [\$/MWh]	TECNOLOGIA
5/8/2017	anta-g1	0.000	Solar Fotovoltaica
5/8/2017	chap-g1	0.000	Biomasa
5/8/2017	lang-g1	0.000	
5/8/2017	lcab-g1	0.000	
5/8/2017	cassa-g1	0.000	
5/8/2017	berl-u2	3.806	
5/8/2017	berl-u1	3.806	Geotermia
5/8/2017	berl-u3	4.175	
5/8/2017	ahua-u1	6.291	
5/8/2017	ahua-u2	6.291	
5/8/2017	ahua-u3	6.776	
5/8/2017	berl-u4	7.834	
5/8/2017	5nov-u2	62.005	
5/8/2017	5nov-u4	62.005	
5/8/2017	5nov-u7	62.005	
5/8/2017	5nov-u3	62.005	
5/8/2017	5nov-u1	62.005	
5/8/2017	5nov-u6	62.005	
5/8/2017	5nov-u5	62.005	
5/8/2017	guaj-u1	64.670	
5/8/2017	15se-g1	72.520	
5/8/2017	acaj-g2	74.857	Termica
5/8/2017	tpto-g1	75.994	
5/8/2017	taln-g1	76.065	
5/8/2017	cgra-g1	76.188	
5/8/2017	acaj-m2	78.167	
5/8/2017	acaj-m5	78.167	
5/8/2017	acaj-m4	78.167	
5/8/2017	acaj-m1	78.167	
5/8/2017	acaj-m3	78.167	
5/8/2017	acaj-m6	78.167	
5/8/2017	holc-m1	82.114	
5/8/2017	taln-g2	82.544	
5/8/2017	soya-g1	88.857	
5/8/2017	text-g3	91.999	
5/8/2017	nepo-g1	92.518	
5/8/2017	text-g1	94.866	
5/8/2017	gcsa-g1	95.084	
5/8/2017	text-m5	95.170	
5/8/2017	text-g2	96.436	
5/8/2017	bore-g1	105.850	
5/8/2017	acaj-u1	124.360	
5/8/2017	acaj-u2	128.980	
5/8/2017	hilc-g1	130.040	
5/8/2017	acaj-u5	174.400	
5/8/2017	acaj-u4	220.280	

Tabla 2. Lista demerito

Fuente, www.ut.com.sv/descargas/programaciondiaria

La lista de mérito mostrada en la tabla 2, corresponde al día 8 de mayo del 2017, se modificó para observar las tecnologías que fueron necesarias para cubrir la demanda.

EL orden de los generadores es ascendente según el costo variable por Mega Watt hora [\$/MWh], encabezando la lista los generadores de ERNC, en color azul la energía solar fotovoltaica, en color rosado los generadores de biomasa, en color verde la energía geotérmica, color morado para los generadores hidroeléctricos y color celeste la los generadores térmicos.

Podemos observar costos variables de \$ 0.000 /MWh en las tecnologías ERNC, solar fotovoltaica, biomasa; costos de hasta \$72.520 /MWh en las tecnologías renovables convencionales y como unidad marginal la unidad 4 de Acajutla, [acaj – u4] aun costo marginal de \$ 220.280 /MWh. Este último costo se convierte en el costo marginal del sistema al cual es cancelado el resto de unidades de la lista de mérito.

2.4 Servicios Auxiliares del Mercado Eléctrico de El Salvador

El ROBCP define los servicios auxiliares como aquellos proporcionados por los Participantes del Mercado, para mantener la calidad y seguridad del sistema.

Los parámetros de calidad del sistema a regular son:

- a) Frecuencia
- b) Voltaje
- c) Distorsión armónica
- d) Variaciones de voltaje

De los cuatro parámetros para mantener la calidad del sistema, el factor más crítico es la frecuencia y como la frecuencia eléctrica está ligada al balance de potencia activa en el sistema eléctrico, suele hablarse indistintamente de control de frecuencia, control de potencia, o control de frecuencia-potencia. De manera breve puede decirse que la frecuencia del sistema y los flujos de potencia por determinadas líneas son las variables que se quieren controlar, y las potencias entrantes a los generadores son las variables empleadas para controlarlas.

Al estudiar el control de frecuencia, se considera que las desviaciones del punto de equilibrio son pequeñas, y que la frecuencia es teóricamente la misma en todos los nodos del sistema. Por ello, el control de frecuencia es un problema que se aborda de manera global.

Las comercializaciones de energía eléctrica quedan programadas con antelación, y cada comercialización debe disponer de las suficientes reservas de energía para hacer frente a sus posibles desequilibrios de la curva de oferta y demanda.

La UT al administrar el mercado eléctrico también se asegura que el sistema pueda hacer frente a cualquier falla que se presenta en alguna unidad o varias unidades, incluyendo el generador de mayor capacidad del sistema eléctrico. Esto se logra a través de lo que se conoce como reserva rodante.

2.4.1 Reserva Rodante

La Reserva Rodante, es la potencia disponible de una unidad generadora que se encuentra sincronizada al sistema. La reserva rodante es una disponibilidad de variar la potencia que se inyecta en la red dentro de un tiempo de respuesta definido. El margen de reserva rodante requerido, incluyendo los compromisos de reserva regionales definidos por el Ente Operador Regional, estará calculado como un porcentaje de la demanda de potencia.

Se calcula como la diferencia entre su potencia máxima neta y la potencia despachada.

El servicio de reserva rodante cumple el objetivo de contar con suficiente capacidad de reserva rápida disponible para cubrir desviaciones en la demanda prevista y contingencias en unidades de generación o en el sistema de transmisión.

La UT asignará el cubrimiento de la reserva rodante a las inyecciones en la red en función de:

- Estar la unidad generadora o GGP habilitado técnicamente por la UT para prestar dicho servicio.
- Los costos variables y precios de las ofertas de retiro de oportunidad.
- El resultado de la operación real.

a) Regulación de Frecuencia

La frecuencia nominal de la red de transmisión es de 60.00 Hz. En condición normal, la UT deberá mantener la frecuencia dentro de un rango entre 60.12 Hz y 59.88 Hz ($\pm 0.2\%$). En condición de emergencia operativa, la UT deberá mantener la frecuencia dentro de un rango entre 60.60 Hz y 59.40 Hz ($\pm 1\%$).

Para propósitos de diseño de equipos y unidades generadoras, deberá tomarse en cuenta que la frecuencia de la red podría sobrepasar los 63.00 Hz o caer por debajo de los 57.00 Hz en circunstancias excepcionales.

Toda unidad generadora debe ser capaz de suplir en forma continua la potencia programada por la UT en un rango de frecuencia comprendida entre 59.40 Hz y 60.00 Hz. Cualquier disminución en la potencia entregada estando la frecuencia entre 58.10 y 59.40 Hz, no podrá ser atribuida a la unidad. La UT realizará las correcciones necesarias (protecciones, uso de reserva), en forma automática o manual, para que esta condición sólo se mantenga por un breve tiempo.

Para equilibrar la frecuencia por los errores por las desviaciones de generación y demanda o por fallos de la red; la reserva rodante se organiza en dos niveles: primario y secundario. Cada uno de los niveles opera en un margen de tiempo e involucra un conjunto de variables provenientes de una parte más o menos amplia del sistema eléctrico.

▪ **Regulación Primaria De Frecuencia (RP)**

La Regulación Primaria de Frecuencia es la regulación automática rápida de frecuencia cuyo objeto es mantener el balance instantáneo entre inyección y retiro ante las variaciones normales entre la generación y la demanda. Se realiza a través de los gobernadores de las unidades generadoras que permiten modificar en forma automática su generación. Esta reserva se administra automáticamente por la UT y es la UT quien asignará entre las unidades generadoras o GGP la reserva para regulación primaria de frecuencia.

Todas las unidades generadoras que estén inyectando a la red de transmisión, deben aportar el 3%¹⁰ de reserva de potencia activa con respecto a la inyección de potencia activa de la propia máquina, la cual será destinada a la regulación primaria de frecuencia del sistema. En el caso

¹⁰ Fuente ROBCP, Anexo 11, numeral 2.1

de los generadores Fotovoltaicos considerando que no cumplen con el compromiso de reserva primaria al no ser gestionables, estos pagarán un precio por regulación primaria de frecuencia¹¹, que será igual a un 20%¹² del costo marginal de operación del sistema en que se ubica la inyección, este cargo será calculado cada hora. Además, el ROBCP establece que estos generadores pagarán los mayores costos de operación y la compensación por menores ingresos a las unidades generadoras que modifican su despacho en relación con el despacho económico con reserva uniformemente repartida¹³.

Para el cálculo de reserva primaria se tomará como ejemplo, la unidad 1 de la CH 5 de noviembre tiene 15.0 MW de potencia, su reserva es: $(15.0 \times 3\%) = 0.450$ MW, por tanto esta unidad de generación, tendrá su máximo de inyección en 14.55 MW para asignar el complemento a reserva primaria. El cálculo del porcentaje de referencia de la reserva para regulación primaria de frecuencia se basa en los siguientes criterios¹⁴:

- La determinación de la energía regulante, la cual está íntimamente ligada a la capacidad del parque generador para compensar los desbalances de corta duración entre oferta y demanda, y de la operación del sistema con el objeto de cumplir los criterios de seguridad y calidad.
- Por la optimización resultante de balancear los mayores costos de producción asociados a la operación del parque de generación fuera del óptimo económico para mantener suficiente reserva para regulación primaria de frecuencia, con los costos evitados de Energía No Servida (ENS) de corta duración asociados a no contar con esa reserva en un semestre determinado.
- La reserva óptima para Reserva Primaria de Frecuencia será aquella que minimice los costos de ENS de corta duración y los mayores costos de operación asociados a mantener esa reserva en el parque generador.

La tasa de toma de carga para asumir las variaciones no previsibles del ciclo de carga, es decir su respuesta inercial por tipo de generación, cuando la capacidad de la unidad generadora se

¹¹ Fuente ROBCP, Anexo 12, numeral 12.5.4.2

¹² Fuente ROBCP, Anexo 11, numeral 2.4.3

¹³ Fuente ROBCP, Anexo 12, numeral 12.5.4.3

¹⁴ Criterios tomados del ROBCP, Anexo 11, Servicios Auxiliares

encuentra entre el 50% y el 100% de su capacidad nominal, deberá ser mejor o igual a las siguientes:

- a) Vapor (carbón o hidrocarburo): 2-5%/min.
- b) Geotérmica: 2-5%/min.
- c) Turbina a Gas: 15-20%/seg.
- d) Motores de Combustión Interna: 5-10%/min.
- e) Hidroeléctrica Alta Caída (caída neta mayor que 75m): 1%/seg.
- f) Hidroeléctrica Media Caída (caída neta entre 35 y 75 m):5%/seg.
- g) Hidroeléctrica Baja Caída (caída neta menor que 35 m): 10% por seg.

▪ **Regulación Secundaria De Frecuencia (RS)**

Es la regulación automática para compensar el error final de la frecuencia resultante de la regulación primaria para que de ser posible y de acuerdo a la magnitud de la perturbación, recuperar el valor nominal de la frecuencia y llevar nuevamente a las unidades que participan en la regulación primaria a su generación programada.

La Regulación Secundaria de Frecuencia es también conocida como Control Automático de Generación (CAG). Esta reserva se administra automáticamente por la UT.

Todas las unidades generadoras que estén inyectando a la red de transmisión, deben aportar como mínimo el 4% de reserva de potencia activa con respecto a la inyección de potencia activa de la propia máquina, la cual será destinada a la Regulación Secundaria de Frecuencia del Sistema. En el caso que un generador no esté habilitado para aportar reserva secundaria, la UT asignará su complemento a otro generador¹⁵, como este es el caso de las ERNC Solar y Eólica, estos generadores deberán pagar el 20%¹⁶ del Costo Marginal de Operación, adicionalmente también pagarán el incremento de costo del sistema provocado por el incumplimiento de aportar dicha reserva.

En el SEP la reserva secundaria es proporcionada exclusivamente por CH Cel Guajoyo, CH 5 de noviembre y la central térmica Duke Energy.

¹⁵ Fuente ROBCP, Anexo 11, numeral 12.6.4.2

¹⁶ Fuente ROBCP, Anexo 11, numeral 3.4.3

Continuando con el ejemplo de la unidad 1 de la CH 5 de noviembre, Potencia nominal 15.0 MW – 0.450 MW (RP) = 14.55 MW, 15.0 MW x 4% (RS) = 0.300 MW. Por lo tanto la unidad 1 de la CH 5 de noviembre dispondría como inyección máxima de 14.15 MW.

Las unidades generadoras que se encuentren operando en el mercado podrán participar en la Regulación Secundaria de Frecuencia, para contribuir en el funcionamiento estable del CAG, si comprometen una respuesta mínima de acuerdo a las especificaciones técnicas de diseño del equipamiento establecidas por el fabricante de la máquina.

Las unidades que participen en la Regulación Secundaria, deben tener instalado una Unidad Terminal Remota (UTR) que actúe de interfaz entre el Sistema de Administración de Energía (SAE) de la UT y el gobernador de la unidad generadora que participará en la Regulación Secundaria de Frecuencia y, disponer de unidades generadoras con gobernador digital o electromecánico.

El gobernador de los generadores que estén prestando el servicio auxiliar de regulación secundaria de frecuencia, debe ejercer la regulación primaria de frecuencia y seguir la consigna del SAE para regulación secundaria de frecuencia.

El tiempo necesario de toma de carga para asumir la consigna de potencia ordenada por la UT por las unidades generadoras que no participen en el CAG, desde que el PM recibe la orden, la ejecuta, hasta que el PM generador ha alcanzado el nivel de consigna; deberá ser mejor o igual a los siguientes valores (por tipo de generación):

- a) Vapor (carbón o hidrocarburo): 3 min.
- b) Motores: 2 min.
- c) Geotérmica: 3 min.
- d) Turbina a Gas: 1 min.
- e) Hidroeléctricas: 1 min.

2.4.2 Regulación de Voltaje

Los valores nominales de voltaje en el sistema de transmisión son 230 kV y 115 kV. En el caso de que los equipos de transformación pertenezcan al PM Transmisor, los valores nominales de voltaje en el lado de entrega serán 46 kV, 34.5 kV y 23 kV. La UT podrá

agregar otros niveles de voltaje si la incorporación de instalaciones adicionales al sistema de transmisión así lo requiera, verificando que no se afecte la operación normal del sistema de transmisión.

En condición normal, la UT deberá mantener el nivel de tensión del sistema de transmisión dentro de un rango entre 95% y 105% del valor nominal.

En condición de emergencia operativa, la UT deberá mantener el nivel de tensión del sistema de transmisión dentro de un rango entre 90% y 110% del valor nominal.

Para propósitos de diseño de equipos y unidades generadoras, deberá tomarse en cuenta que el voltaje de la red podría sobrepasar el 120% o caer por debajo del 80% del valor nominal.

La potencia reactiva inyectada o absorbida en una unidad generadora operando en estado estable, deberá estar completamente disponible en un rango de variación del voltaje del 5% hacia arriba en el caso de sobreexcitación del generador o un 5% por debajo en el caso que la unidad está trabajando en condición de subexcitación.

El factor de potencia en cualquier punto de retiro neto, en cualquier intervalo de Mercado, deberá ser igual o mayor a 0.950, atrasado o adelantado.

2.4.3 Contenido Armónico

En condiciones normales, los máximos niveles de distorsión armónica que puede tolerar el sistema de transmisión debido a todas las fuentes de armónicas que se encuentran en la red, estarán regido por la norma IEEE-519¹⁷.

Las componentes máximas de corrientes armónicas como porcentaje de la corriente fundamental son:

¹⁷ Norma completa, <https://standards.ieee.org/findstds/standard/519-2014.html>

Nivel de voltaje superior o igual a 115 KV

I _{cc} /I _L	h≤11	11<h≤17	17<h≤23	23<h≤35	h>35	THD
<20	2.00	1.00	0.75	0.30	0.15	2.5
20-50	3.50	1.75	1.25	0.50	0.25	4.0
50-100	5.00	2.25	2.00	0.75	0.35	6.0
100-1000	6.00	2.75	2.50	1.00	0.50	7.5
>1000	7.50	3.50	3.00	1.25	0.70	10.0

Nivel de voltaje inferior a 115 KV

I _{cc} /I _L	h≤11	11<h≤17	17<h≤23	23<h≤35	h>35	THD
<20	4.00	2.00	1.50	0.60	0.30	5.0
20-50	7.00	3.50	2.50	1.00	0.50	8.0
50-100	10.00	4.50	4.00	1.50	0.70	12.0
100-1000	12.00	5.50	5.00	2.00	1.00	15.0
>1000	15.0	7.00	6.00	2.50	1.40	20.0

Tabla 3. Corrientes armónicas.

Fuente: ROBCP, Anexo 12.4

Dónde:

h: componente armónica de la corriente. **I_{cc}:** corriente de cortocircuito

I_L: corriente de carga. **TDH:** Distorsión armónica total

2.4.4 Fluctuaciones de Voltaje

Las variaciones de voltaje en los puntos de acoplamiento de PM no deberán de exceder el 4% del nivel del voltaje, ante cambios súbitos tanto de carga como de generación.

La severidad de las variaciones de voltaje de corta duración hasta 0.6 pu y las variaciones de larga duración de 0.8 pu, estarán sujetas a los estudios pertinentes desarrollados para el caso particular. Desbalance de Fases En condición normal, la máxima componente de secuencia negativa del voltaje deberá permanecer por debajo del 1%.

2.5 Energías Renovables No Convencionales (ERNC)

Las energías renovables podemos clasificarlas en convencionales o no convencionales, según el tipo de desarrollo de las tecnologías que se utilizan en cada caso.

En el ROBCP sección 1.1, se define que las Unidades generadoras renovables no convencionales son aquellas cuya fuente de energía primaria es eólica, solar, biomasa o mareomotriz¹⁸.

En El Salvador para garantizar la inclusión de generadores renovables no convencionales se realizaron importantes modificaciones a la operación del mercado y al marco legal para fomentar la inversión y la creación de categorías de los proyectos.

a) Modificaciones a la Operación del Mercado

▪ Decreto Ejecutivo N° 15

Las licitaciones destinadas a generación de fuente renovable no convencional, se podrán suscribir mediante contratos de suministro no estandarizados, sin compromiso de potencia firme.

▪ Decreto Ejecutivo N° 80

Las centrales de generación de fuente renovable de energía no convencional tienen prioridad de despacho, para cuyos efectos se les considerará con costo variable de operación igual a cero.

▪ Acuerdo No132-E-2014

Modificaciones a las “Normas sobre contratos de largo plazo mediante procesos de libre competencia”.

b) Incentivos a las Inversiones del Sector Eléctrico

▪ Ley de Incentivos Fiscales¹⁹

Para el fomento de Energías Renovables en la generación de electricidad.

1. Exención de derechos arancelarios a la importación. (Durante los primeros 10 años).

¹⁸ ROBCP, Glosario 1, Definiciones 1.1

¹⁹ <http://www.asamblea.gob.sv/ley-de-incentivos-fiscales-para-el-fomento-de-la-energia-renovable-en-la-generacion-de-electricidad>

2. Exención del impuesto sobre la renta por un período de cinco años para proyectos mayores a los 10 megavatios (MW), y por 10 años para menos de 10 megavatios (MW).
3. Exención total del pago de impuestos sobre los ingresos provenientes directamente de la venta de las Reducciones Certificadas de Emisiones (CERs, en el marco del mecanismo para un desarrollo limpio), o mercados de carbono similares.

- **Ley Especial de Asocios Público Privados²⁰**

1. Desarrollo de proyectos de Asocios Público-Privados para la provisión de infraestructura y servicios públicos de interés general, de forma eficaz y eficiente.

- **Ley de Inversiones²¹**

1. Trato igualitario a inversionistas nacionales y extranjeros.
2. Libre transferencia al exterior de utilidades y dividendos relacionados con la inversión.
3. Acceso a financiamiento local.

c) Categorización de Proyectos ERNC

De acuerdo a su tamaño e impacto, los proyectos de energías renovables no convencionales pueden requerir la realización de menos trámites y permisos, lo que incentiva al desarrollo.

	GRUPO A	IMPACTO POTENCIAL BAJO	No requiere la presentación de documentación ambiental.
	GRUPO B	CATEGORÍA 1 IMPACTO POTENCIAL MODERADO	Únicamente requiere la presentación de un pequeño formulario.
CATEGORÍA 2 IMPACTO POTENCIAL ALTO		Se requiere la presentación de un estudio de impacto ambiental	

Figura 6. Categorización de proyectos ERNC

Fuente: www.cne.gob.sv

²⁰ <http://www.asamblea.gob.sv/ley-especial-de-asocio-publico-privados>

²¹ <http://www.asamblea.gob.sv/ley-de-inversiones>

2.5.1 ERNC en El Salvador.

En El Salvador el desarrollo de las energías renovables se planificó desde el Consejo Nacional de Energía (CNE) que depende del Ministerio de Economía (MINEC). Desde la creación del CNE se desarrolló un estudio en cooperación con la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA), este documento denominado: “Plan Maestro para el desarrollo de la energía renovable en El Salvador (2012)”, detalla la proyección para la diversificación de la matriz energética nacional proyectada hasta el año 2026. El Plan Maestro se elaboró sobre la base de siete tipos de energías renovables y pretende ser un Plan Indicativo de Desarrollo para 15 años distribuidos en tres fases que abarcan desde el 2012 hasta el 2026.

Al observar la matriz energética 2016 muestra una generación mayoritariamente térmica, indicando a la fecha que El Salvador sigue dependiendo de los combustibles fósiles (43.1%). No existe presencia de energías renovables no convencionales a excepción de la generación por biomasa.

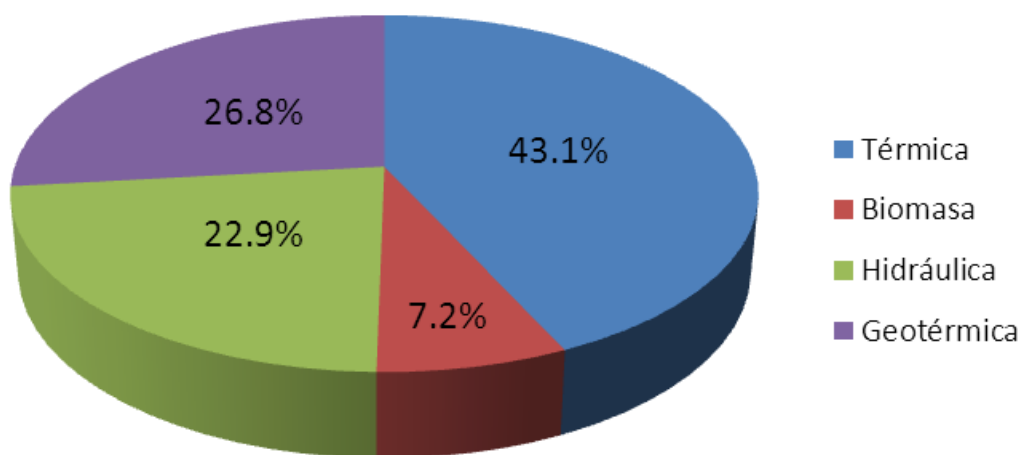


Figura 7. Matriz energética, 2016

Fuente: Anuario Estadístico de la UT, 2016

Para el año 2026 se proyecta que la matriz energética cambie drásticamente aumentando la producción de biomasa (45MW), energía eólica y solar fotovoltaica²².

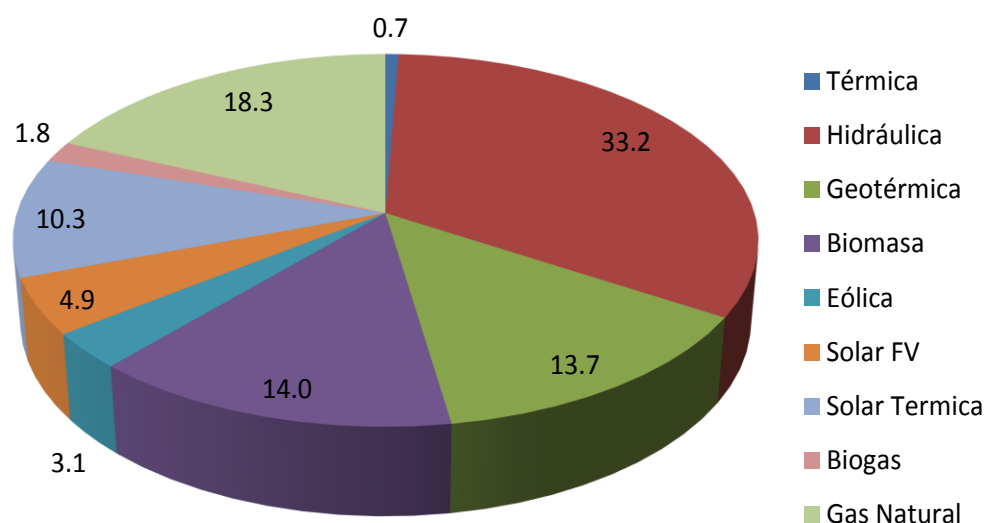


Figura 8. Matriz energética, 2026, proyectada

Fuente: Plan Maestro 2012

Con la proyección de la matriz energética a 2026 observamos una drástica disminución en combustibles fósiles (< 1%), participación de las ERNC solar y eólica, 4.9% y 3.1% respectivamente, en esta matriz además de considerar los datos del plan maestro, se incorporan 355MW de Gas Natural²³, porque se considera la incorporación de este proyecto al 2020; este generador a gas ayudará a amortiguar el efecto de la intermitencia de las ERNC.

Con las proyecciones de las ERNC's se crea una condición única tal como se refleja en la matriz energética, este es un comportamiento nuevo para el sistema eléctrico nacional, donde las reservas primaria y secundaria además de compensar los errores de las proyecciones de demanda y fallos en el sistema, deberán compensar la intermitencia de los recursos renovables. En vista que las plantas fotovoltaicas producen electricidad cuando hay luz solar y, en el caso de la generación eólica que no sigue un patrón tan fijo, pero en general la producción aumenta por la tarde hasta caer el sol, en ese momento la producción eólica disminuye desde su máximo. Debido a esta intermitencia las ERNC solar fotovoltaica y

²² Plan Maestro para el desarrollo de las energías renovables, Capítulo II, CNE-JICA

²³ Licitación Pública Internacional DELSUR-CLP-001-2012, adjudicada en noviembre 2013.

eólica, no aseguran el suministro en los momentos más críticos o en momentos de fallas del sistema, limitando el porcentaje de penetración de los generadores de Energía Renovable No Convencional.

En El Salvador, se tiene desde finales de marzo 2017 una planta solar fotovoltaica inyectado al mercado mayorista de energía eléctrica. En la figura 9 se muestra gráficamente el comportamiento de generación diaria correspondiente al 29/05/2017, donde se visualiza claramente el comportamiento intermitente del recurso primario.

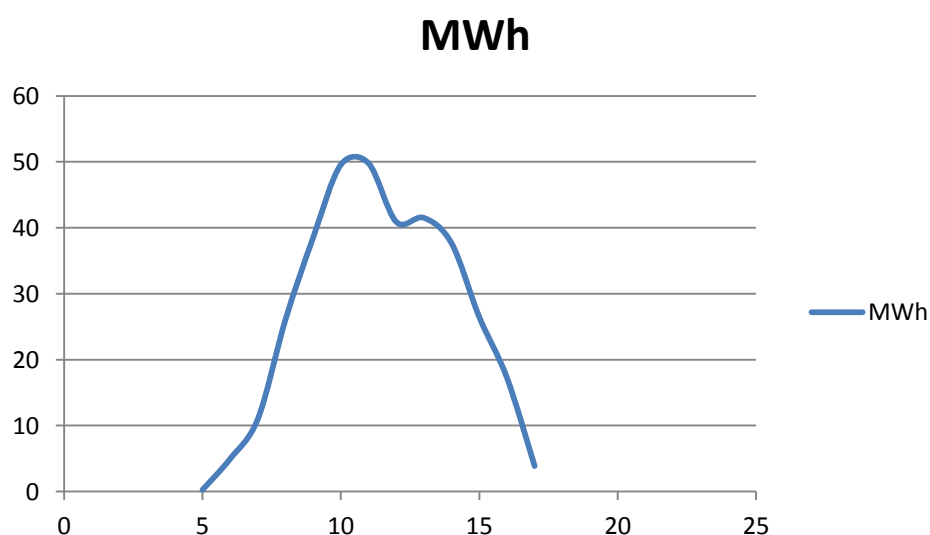


Figura 9. Generación de Planta Solar Fotovoltaica, Antares

Fuente: www.ut.com.sv/operacion-diaria

2.5.2 Naturaleza de las Energías Renovables No Convencionales.

La incorporación de las fuentes de generación ERNC (como la Generación Solar y Eólica), introducen nuevas variables aleatorias al sistema eléctrico nacional, ya que la dispersión en la magnitud de esta generación (debidas al origen aleatorio del recurso primario utilizado), deberá ser compensada, al igual que las variaciones de la demanda, por generación de tipo convencional.

A su vez, la incorporación en el despacho de generación de origen renovable, disminuye las máquinas en servicio con capacidad de regulación por el mercado basado en costos de producción, como quedó demostrado en la lista de mérito.

La naturaleza intermitente de las ERNC hace que ésta deba despacharse siempre que esté disponible, exigiendo mayor flexibilidad al resto del sistema. Como consecuencia, una fuente convencional y una intermitente pueden tener costos de desarrollo similares pero resultar en costos muy distintos para un sistema eléctrico.

Es importante hacer una consideración sobre la inclusión de ERNC, en particular de tipo solar fotovoltaico, y es que la misma reemplaza por una cierta cantidad de horas a fuentes de mayor costo de producción y más contaminantes, pero pasado el periodo diurno (5.4 h máxima para El Salvador)²⁴ se tiene que prescindir de ese tipo de generación para volver a utilizar fuentes de energía convencionales.

Este hecho implica que una maquina térmica, como son los generadores alimentados con bunker o diésel existentes en el SEP, deberá reducir su generación o ser desconectados del sistema por unas horas para luego volver aumentar su aporte o ser reconectado y sincronizado a la red. Estas maniobras implican, para las empresas de generación un sobre costo de operación y mantenimiento, por lo que también la disponibilidad de la generación convencional estaría poniendo un límite a la incorporación de mayor cantidad de fuente de ERNC.

En la siguiente tabla se resumen las características de las ERNC y su impacto en el sistema de potencia y el mercado eléctrico de El Salvador, sin la inclusión de cambios y medidas adicionales al sistema, como lo es incorporar generadores de naturaleza flexible que amortigüen este impacto.

²⁴ Valor promedio anual Fuente Proyecto Swera – El Salvador

CARACTERISTICA	DESCRIPCION	IMPACTO
Variabilidad o intermitencia	Las fuentes intermitentes como el viento y el sol, presentan una generacion que varia significativamente en diferentes escalas de tiempo (mensual, semanal, diaria) segun la intensidad de sus recurso energetico.	Como consecuencia de esta intermitencia, la generacion electrica de las fuentes renovables no es gestionable, es decir, no es despachable en el sentido que no puede ser controlada o programada, puesto que una fuente despachable puede comenzar a operar o detenerse o modificar su produccion para ajustarse a la demanda.
Mayor nivel de incertidumbre	Generar electricidad con fuentes intermitentes no solo es variable sino que tambien es muy dificil de pronosticar	Se reduce el control sobre la generacion resultante de estas fuentes. El pronostico de generacion es inesperado, lo que conlleva a errores asociados que condicionan la operacion del sistema electrico imponiendo restricciones y costos adicionales.
Especificidad en la Ubicación	La ubicacion de los recursos variables es exogena al operador de un sistema electrico.	NO se distribuye uniformemente a traves de un territorio ni es posible cambiar su ubicacion.

Tabla 4. Impacto de las ERNC en SEP

Fuente: Elaboración propia

2.6 Generación Flexible como complemento de las ERNCs

Se llama así a centrales de gran potencia, que pueden operar en lugares remotos y complementar el trabajo de plantas de ERNC, es la apuesta energética en el mundo, principalmente en Europa y Estados Unidos. A manera de ejemplo en Alemania Wärsilä suministrará una central eléctrica de cogeneración (CHP) de 100 MW²⁵ a Kraftwerke Mainz-Wiesbaden AG en Alemania para la producción de electricidad y vapor. La central de tipo Smart Power Generation, contará con diez motores Wärsilä 34SG de gas natural, y está previsto que funcione a pleno rendimiento a finales de 2018.

“Al contrario que las centrales eléctricas de cogeneración tradicionales, basadas en carbón o turbinas de gas, los motores de gas de Wärsilä se pueden arrancar y parar sin limitaciones en tan solo 2 minutos. Esto nos permite operar en los mercados de balance, puesto que podemos ajustar la entrega de potencia rápidamente para responder a las fluctuaciones en la demanda eléctrica,” dice el Dr. Lars Eigenmann, CEO de Kraftwerke Mainz-Wiesbaden AG.

El Dr. Eigenmann explica además, que la flexibilidad de operación sin igual representada por los motores Wärsilä, ofrecen a Kraftwerke Mainz-Wiesbaden una forma completamente nueva de operar sus centrales eléctricas de manera rentable. “Con una capacidad flexible como esta, tenemos la posibilidad de operar con éxito en los momentos del día en los que no hay energía solar o eólica disponible en Alemania. Podemos arrancar y parar varias veces al día, y vender la electricidad a los mercados europeos al por mayor.”

Costos competitivos, flexibilidad de operación, elevada eficiencia y potencia son algunos de los requerimientos que se solicitan hoy para dar cobertura a los requerimientos

²⁵ <http://smartgridspain.org/web/wartsila-suministrara-una-central-electrica-flexible-cogeneracion-100mw-alemania/>

crecientes de energía. Dentro de este contexto, aparecen una serie de tecnologías, tales como las denominadas soluciones de generación flexible.

Para que una central se considere una tecnología de generación flexible, debe cumplir preferentemente con tres cualidades.

1. Alta eficiencia eléctrica, la cual involucra a su vez costos de energía eléctrica muy competitivos.
2. Flexibilidad de combustible, lo que significa que puede operar con una diversidad de estos, sean líquidos o gaseosos, e incluso ambos, abarcando una gama tan amplia que puede ir, por ejemplo, desde diésel, gas natural y biodiesel, hasta aceite de soja y de palma. Esto es lo que se conoce como multifuel.
3. Flexibilidad operacional, y alude a la capacidad de las centrales eléctricas para responder ante la intermitencia, en especial cuando se trata de suplir esta en pos del funcionamiento de las plantas de generación en base a Energías Renovables no Convencionales. Este tipo de centrales tienen una gran capacidad de toma y rechazo de carga, pudiendo adaptarse a las demandas de energía sin ver disminuida su eficiencia. Esto último cobra particular importancia en el caso de El Salvador, donde se requiere no solo diversificar la matriz energética, sino que también aumentar la presencia de ERNC, para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y disminuir la huella de carbono en lo que a generación de energía eléctrica se refiere, para lo cual sin duda se necesita de una solución altamente eficiente que supla las intermitencias habituales de las energías renovables solar y eólica.

Como se observa en el ejemplo de aplicación de motores Wartsila en Alemania, los generadores con turbinas operadas a gas natural, también cumplen los requerimientos para ser consideradas como generadores flexibles, porque se pueden adaptar a varios

combustibles si el caso lo requiere y utilizar gas natural o gas etanol, como es el caso de Wärtsilä 50DF²⁶.

El gas natural es percibido como una buena fuente de electricidad por un significativo número de razones, de índole económicas, como operacionales y ambientales: es de bajo riesgo (técnico y financiero), produce menos emisiones de carbono que otros combustibles fósiles, además las plantas de gas se pueden Construir con Relativa rapidez, en algunos casos en alrededor de dos años, a diferencia de las instalaciones hidroeléctricas, cuya construcción puede llevar mucho más tiempo.

De acuerdo con las previsiones mundiales el gas natural seguirá aumentando su cuota en la matriz energética mundial, con un crecimiento del 2% por año hasta 2020²⁷. Las centrales de gas natural son flexibles, tanto en términos técnicos como económicos, para reaccionar rápidamente a picos de demanda, y están perfectamente hermanadas con opciones renovables no convencionales, específicamente con las de naturaleza intermitente como es el caso de la energía eólica y la energía solar fotovoltaica. Varios picos de demanda ocurridos en el transcurso de un mes, tienen un importante efecto multiplicador sobre el costo de la electricidad entregada, por lo que tener una fuente de energía como el gas, que puede hacer frente a estos picos, es una ventaja significativa.

²⁶ Artículo sobre la operación del motor con diversos combustibles, <http://www.wartsila.com/>

²⁷ Proyección de la Agencia Internacional de Energía, <http://www.iea.org/topics/naturalgas/>

III. IMPACTO EN LA RESERVA RODANTE DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA ANTE LA INTEGRACIÓN DE ERNC

3.1 Determinación de la ERNC Máxima a Incorporar en el SEP.

En el 2014 se desarrolló un estudio para evaluar el impacto de las ERNC en el desempeño de la Reserva Operativa Rodante (ROR) del sistema de potencia²⁸. En este estudio se evaluó el comportamiento del sistema eléctrico de potencia de El Salvador (SEP) desde diferentes panoramas, de manera que permitiera contemplar los aspectos que tienen influencia cuando se incorpora generación renovable no convencional en un sistema eléctrico de potencia.

La finalidad del estudio fue, por un lado, verificar el plan oficial de incorporación de ERNC en el sistema de El Salvador y por el otro, establecer la magnitud máxima de este tipo de energía que puede ser incorporada, manteniendo en ambos casos niveles aceptables de confiabilidad en la operación del sistema, de acuerdo a la Reserva Operativa Rodante existente en el mismo.

Los resultados de este análisis concluyeron:

- El sistema no presenta ninguna restricción en lo que respecta a la calidad de servicio del sistema, ya que en funcionamiento estacionario no se presentan sobrecargas en líneas y transformadores, y tampoco aparecen problemas en el perfil de tensión.
- Desde el punto de vista del Análisis de la ROR, el SEP aporta un margen de Regulación Primaria de Frecuencia (RPF) del orden de 0.16% (aunque la reserva es del 3%), para la contingencia de pérdida intempestiva de 65 MW de generación de la CH Cerrón Grande²⁹. El reducido aporte a la RPF del parque generador de El Salvador, es producto de la magnitud de la potencia que aporta el SIEPAC.

²⁸ Estudio Análisis del desempeño de la reserva rodante del sistema eléctrico de potencia de El Salvador ante la integración de energías renovables no convencionales (eólica y solar fotovoltaica), 2015

²⁹ Unidad de mayor generación del SEP de El Salvador, www.cne.gob.sv

A partir de la incidencia que tiene el valor límite adoptado de Probabilidad de Reserva Suficiente ($\Pr(\Delta < \text{ROR})$), en la magnitud máxima de la generación de ERNC que puede incorporarse en el sistema, se ha realizado una evaluación considerando distintos valores de esta probabilidad.

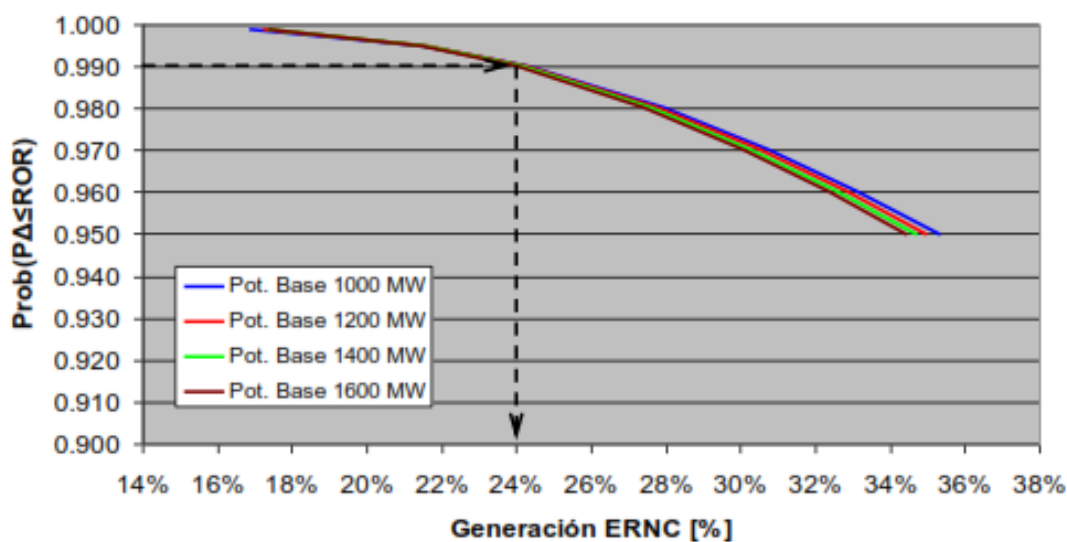


Figura 10. Curva de Probabilidad de RORs suficiente / Generación ERNC

Fuente: Análisis del desempeño de la ROR, 2015

La Máxima Participación de ERNC que puede incorporarse al sistema (satisfaciendo condiciones de operación aceptables) es prácticamente independiente del estado de carga en que se encuentre el sistema, ya que las curvas obtenidas son muy semejantes para los distintos estados de demanda del sistema.

La magnitud máxima de generación de ERNC que puede incorporarse, está directamente relacionada al valor límite de Probabilidad de Reserva Suficiente ($\Pr(\Delta < \text{ROR})$) que se adopte para el cálculo. En virtud de los resultados obtenidos en el estudio, se concluyó que el valor más razonable de Probabilidad de Reserva Suficiente Límite es el de **0.990**,

que significa una participación máxima del **24% de ERNC**³⁰ del total de generación, que corresponde a **257.86 MW** en relación a la capacidad firme de **1,074.417 MW**³¹ reportada a junio del 2017.

3.2 Implicaciones de la participación máxima de ERNC.

En la matriz energética proyectada 2026 se observa una participación del 19% de energía eólica y solar (térmica y fotovoltaica), esto crea un panorama de crecimiento donde el margen para incorporar ERNC es levemente mayor al 4%, basados en 24% como máxima participación de ERNC sin importar la potencia base, como lo demuestra la gráfica de generación máxima.

Las energías renovables solar y eólica incorporan un problema adicional en la generación eléctrica, puesto que, estas no aseguran la producción de electricidad en las horas de mayor consumo y tampoco cuentan con sistemas de reserva operativa rodante, lo que implicaría que toda la ROR recaerá sobre la energía hidroeléctrica, puesto que en la matriz energética 2026 teóricamente no existe la energía térmica convencional, y únicamente se utilizaría como reserva fría del sistema.

3.2.1 Impacto de las ERNC en el sistema eléctrico.

La demanda de electricidad siempre ha reflejado cierta variabilidad. Las variaciones a corto plazo en la demanda se producen porque los consumidores de electricidad la utilizan sin ningún patrón, encienden y apagan aleatoriamente los equipos eléctricos. El efecto neto de esta demanda es pequeño y los generadores convencionales pueden adaptar su producción de electricidad sin mayor inconveniente

³⁰ Estudio Análisis del desempeño de la reserva rodante del sistema eléctrico de potencia de El Salvador ante la integración de energías renovables no convencionales (eólica y solar fotovoltaica), 2015

³¹ Informe de capacidad firme definitiva, junio 2017, Unidad de Transacciones

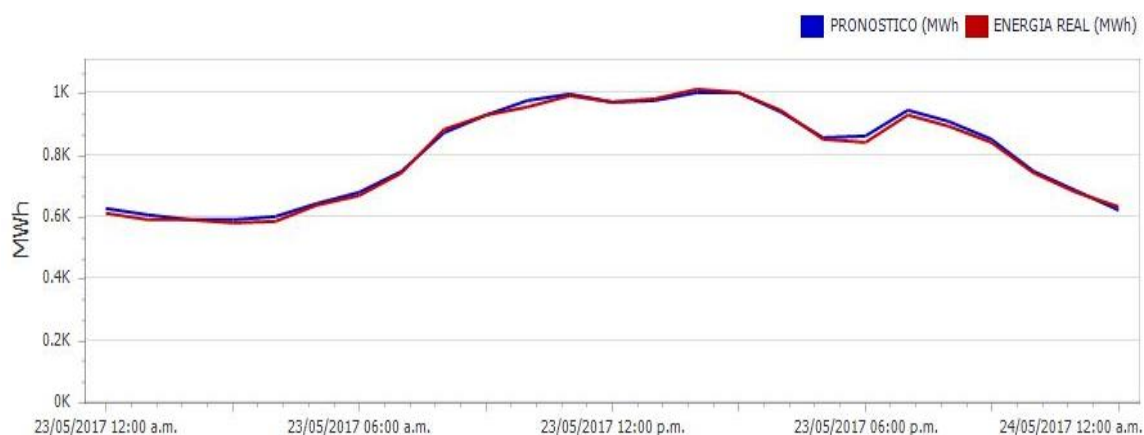


Figura 11. Gráfica de Pronóstico vs Demanda

Fuente, Unidad de Transacciones, estadísticas mayo 2017

En la gráfica se observa el comportamiento de la demanda en El Salvador, donde se pueden evidenciar las variaciones del pronóstico respecto al consumo real de energía, el mayor diferencial fue 19.21 MW a las 6:00 pm, estas variaciones se consideran mínimas siendo el error de 2.23%.

Para ejemplificar la generación ERNC, se considera el caso de Chile en el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), la gráfica muestra un panorama más amplio, puesto que, incluye diversos parques tanto eólicos como solares, y donde claramente se observa el comportamiento variable de las ERNC. Para los días mostrados en la gráfica se observa una diferencia de 68MW entre pronóstico y demanda real de energía, siendo el error de 13.39%.

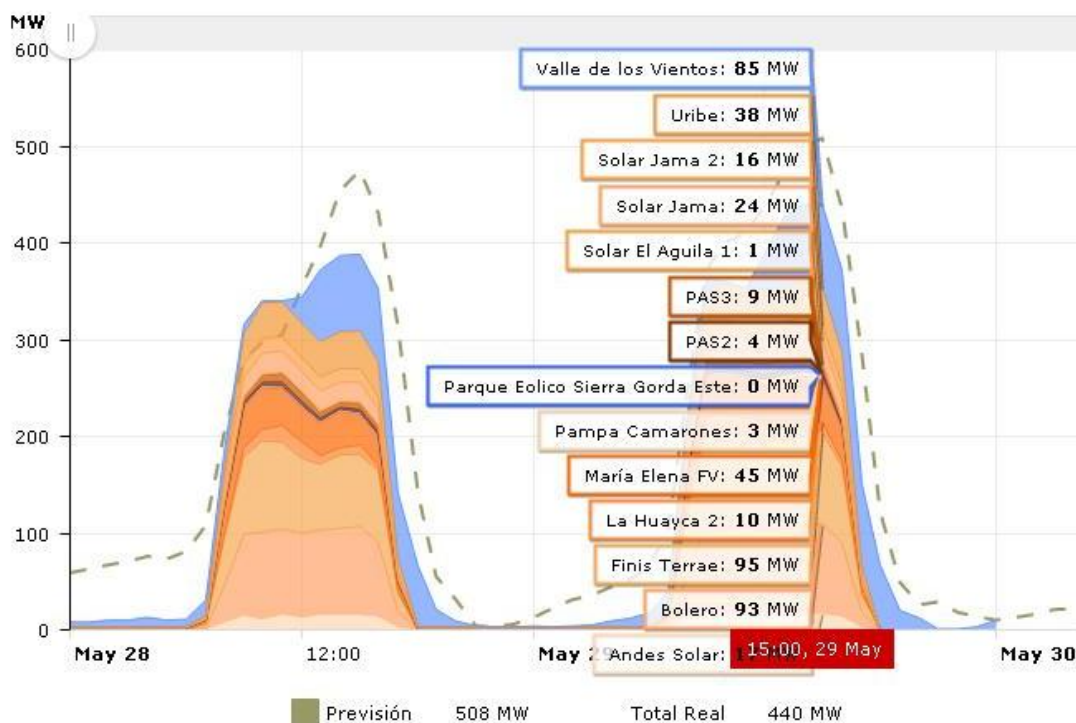


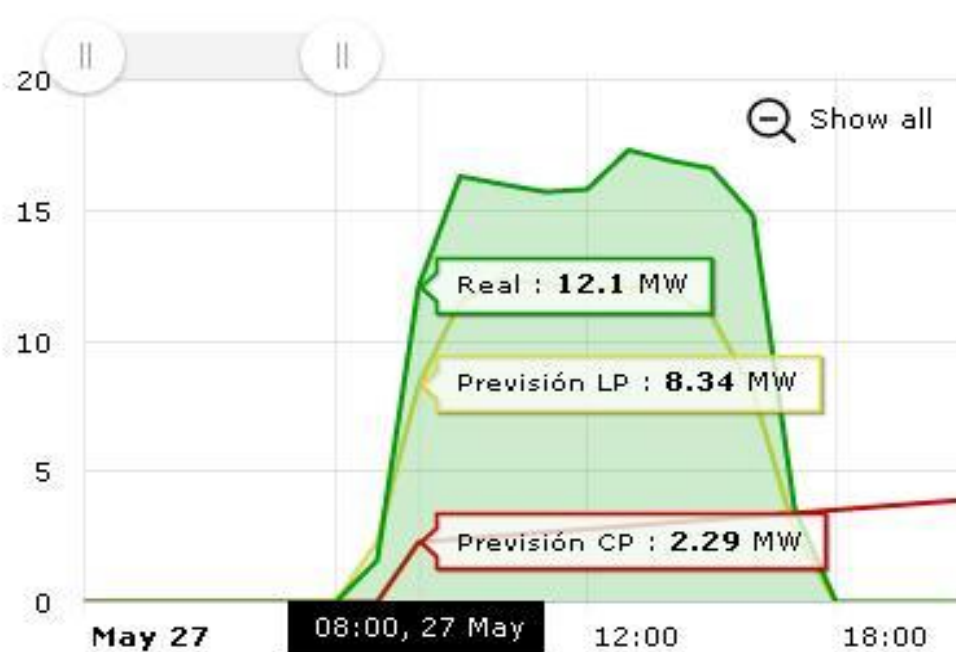
Figura 12. Detalle Horario de Generación ERNC

Fuente, Coordinador Eléctrico Nacional, Chile, mayo 2017

La naturaleza de las ERNC eólica y solar en la producción de electricidad genera una variabilidad que es mayor a la variación de la demanda (2.3% vs 13.39%) y, puesto que las redes de transmisión y distribución eléctricas no tienen prácticamente ninguna capacidad de almacenamiento de energía, la producción y el consumo de electricidad siempre deben transarse de forma exacta, porque si la energía de los generadores supera el consumo de electricidad más pérdidas del sistema, los generadores aumentará su velocidad y, simultáneamente, la frecuencia en el sistema se desplazará hacia arriba (> 60 Hz), y el efecto opuesto, si la demanda es superior a la generación, disminuirá la frecuencia (< 60 Hz). Como se acoto en el capítulo II, para que el sistema funcione correctamente, la frecuencia tiene que mantenerse dentro de límites estrechos (59.88 a 60.12 Hz), además, los generadores se apagan si su carga está por debajo de cierto umbral

de producción. Pero por el contrario, si los generadores que están en línea no pueden satisfacer un incremento en la demanda, unidades de generación adicionales tienen que entrar en operación, y este complemento de demanda lo proporcionan las unidades térmicas puesto que las hidroeléctricas siempre turbinan a su máximo y su reserva es la ROR que el operador le exige.

Evaluando el SEP se tiene la producción de la planta fotovoltaica de Andes Solar en Chile de capacidad de 22 MW pico instalado, cuando el sol se pone, la salida del generador fotovoltaico desciende a cero, mientras que la demanda de electricidad es considerable desde las primeras horas de la mañana.



Comparación Generación Real versus Prevista

Figura 13. Generación Planta Andes Chile.

Fuente, Coordinador Eléctrico Nacional, Chile, mayo 2017

Los aspectos que son afectados en el SEP por la incorporación de la ERNC y su variabilidad, se detallan a continuación:

a) Equilibrio de la Red

Con mucha capacidad renovable intermitente en el sistema, la tarea de equilibrio recae en los generadores convencionales que cada vez están siendo más exigidos hasta llevarlos a operar de forma ineficiente y costosa, porque es de mencionar que en adición a la necesidad de equilibrio normal del sistema de potencia, hay que equilibrar los defectos y fallas pueden producirse, y que de hecho se producen en los sistemas de suministro de electricidad. Estas anomalías quiebran el balance entre la oferta y la demanda, porque una planta de energía que falla resulta en una pérdida instantánea de la electricidad. Inmediatamente a la ocurrencia de una pérdida en la capacidad de generación, la inercia rotatoria del sistema ayuda a evitar un cambio brusco en la frecuencia, pero una consecuente caída en la frecuencia es inevitable en pocos minutos y es por eso que la UT asigna las reservas de los generadores que están en línea para compensar la pérdida unidad.

Con una fracción creciente de la capacidad de energía solar fotovoltaica y la incorporación proyectada al primer trimestre de 2019 de 120 MW de energía eólica³² en el SEP de El Salvador, se convierte cada vez más difícil tener la ROR óptima para mantener el equilibrio del sistema, si se considera la variación del pronóstico de la demanda más la variabilidad de las ERNC más la pérdida por falla de unidad generadora, que para El Salvador el caso crítico es la pérdida de 65MW en CH Cerrón Grande³³, se presentaría un panorama del SEP muy crítico para equilibrar con la inmediatez del caso.

³² Licitación Pública Internacional N. DELSUR – CLP – RNV – 1 – 2016

³³ Estudio Análisis del desempeño de la reserva rodante del sistema eléctrico de potencia de El Salvador ante la integración de energías renovables no convencionales (eólica y solar fotovoltaica), 2015

b) Actualización Tecnológica a corto plazo

Las ERNC están obligando a los generadores existentes a transformarse en centrales más ágiles que respondan no solo a las variaciones actuales sino que se incorporen y puedan seguir la intermitencia y aleatoriedad de un recurso primario como el sol o el viento. Las centrales eléctricas modernas deberán evolucionar tecnológicamente para llegar a ser centrales altamente flexibles con índices de respuesta rápidos, tanto en el arranque como en paro de sus unidades, todo esto para seguir la curva de demanda y producción, además de mantener la calidad de la energía eléctrica y bajos costos de operación para no afectar el valor del KWh. Esta actualización es la siguiente generación de centrales eléctricas donde la respuesta a contingencia es en el orden de segundos.

c) Variación en los precios de la energía

La experiencia internacional muestra que la integración de las ERNC, impone costos al sistema eléctrico por concepto de respaldo en generación, principalmente por el ciclado de generadores térmicos, el uso intensivo de la red de transmisión con bajo factor de planta, reservas rodantes adicionales y servicios auxiliares para mantener la calidad de la energía eléctrica. Estos factores han implicado mayores costos al consumidor final además, de ocasionar la pérdida de competitividad en algunos países. Como ejemplo se tienen los FIT (Feed In Tarif³⁴). El FIT es un instrumento normativo que impulsa el desarrollo de las ERNC, mediante el establecimiento de una tarifa especial, premio o sobre precio, por unidad de energía eléctrica inyectada a la red por unidad de generación ERNC, es decir, interviene el precio que es recibido por el generador ERNC, obteniendo éste actor, claridad sobre el precio mínimo que le será pagado por concepto de electricidad. Este sistema surgió en EE.UU. con la Public Utility Regulatory Policies Act

34 Fuente: <http://www.fitariffs.co.uk/FITs/>

(conocida como PURPA³⁵) en 1978, siendo adoptado por aproximadamente 50 países y Estados, destacándose Alemania, España y Dinamarca.

Este tipo de normativas se crean para beneficiar la incorporación de la energía fotovoltaica y ofrecer al inversionista un pago preferencial sobre la energía producida por medios renovables, esto con el fin de volver las ERNC económicamente viables pero con los años esto llevó a exceder los objetivos de participación de dicha tecnología, lo cual en el largo plazo derivó en costos excesivos a los generadores convencionales y consumidores de electricidad.

Estos costos considerados nuevos para el precio de la energía se pueden clasificar en nuevas categoría, según se detalla:

i. Costos de Balance.

En el corto y mediano plazo, el sistema de generación debe incorporar generación intermitente lo que conlleva costos de balance. Esta categoría de costos es una consecuencia de la naturaleza variable y aleatoria de las fuentes de generación intermitentes.

En este sentido, la generación ERNC incrementa la frecuencia de cambios de carga neta exigiendo mayor capacidad de respuesta del sistema en distintas escalas temporales (desde minutos a días). En particular, para lograr equilibrar la oferta con la demanda en cada instante, la integración de generación variable impone requerimientos de mayor generación flexible y de reservas.

En esta categoría de costos también se identifican las componentes asociadas al uso flexible de los generadores térmicos como reserva fría del sistema.

Considerando las restricciones de arranque y paro que tienen las centrales térmicas, el uso de las centrales hidroeléctricas para dar reserva rodante, implicara que las centrales

³⁵ http://www.ucsusa.org/clean_energy/smart-energy-solutions/strengthen-policy/public-utility-regulatory.html

térmicas eficientes deberán reducir su generación durante el día a fin de efectuar los aportes que no realizan las centrales ERNC. Esto tiene implícito mayores costos de operación.

ii. Costos de perfil de generación

La penetración a gran escala de fuentes intermitentes, puede llevar a reducir los niveles de generación de centrales térmicas, incluso sin considerar los costos asociados a la utilización sub óptima de la capacidad térmica. La reducción en las horas de operación de las centrales térmicas reduce su generación total aumentando el costo medio en el llamado efecto de utilización³⁶ además de reducir significativamente su factor de planta.

iii. Costos de red

La existencia de bloques de generación con alta estacionalidad e intermitencia, aumenta los requerimientos del sistema de transmisión. La integración a gran escala de generación intermitente hace necesarios mayores holguras de capacidad a fin de efectuar modulaciones y transferencias de carga, puesto que, las centrales generadoras convencionales y no convencionales suelen estar en distintas zonas geográficas.

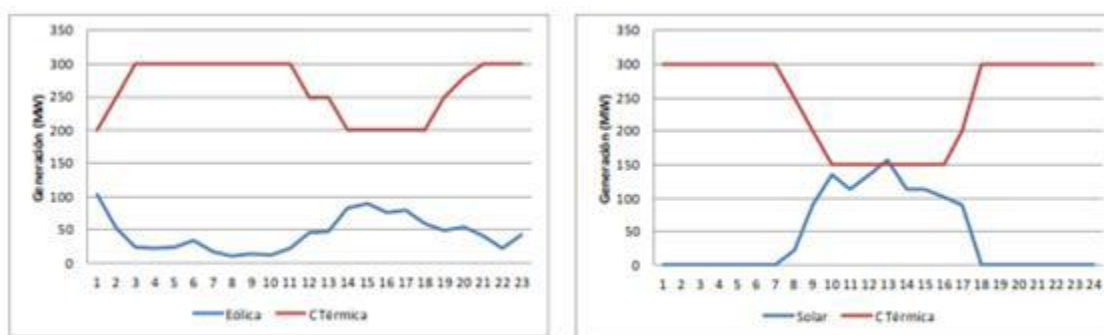


Figura 14. Generación horaria de centrales térmicas y ERNC

Fuente, Coordinador Eléctrico Nacional, Chile

³⁶ *The Economics of Renewable Electricity Market Integration, Chapter 3, 2012*

Como se observa en la figura 15, adicional al costo de energía eléctrica o LCOE por sus siglas en inglés (Levelized cost of Energy) se consideran los costos de integración de las ERNCs al sistema, lo cual modifica el costo de la energía, y de no considerarse distorsionan cualquier análisis costo-beneficio que se desarrolle, enviando información errónea respecto a tiempos de recuperación afectando futuras inversiones y desvirtuando las actuales.

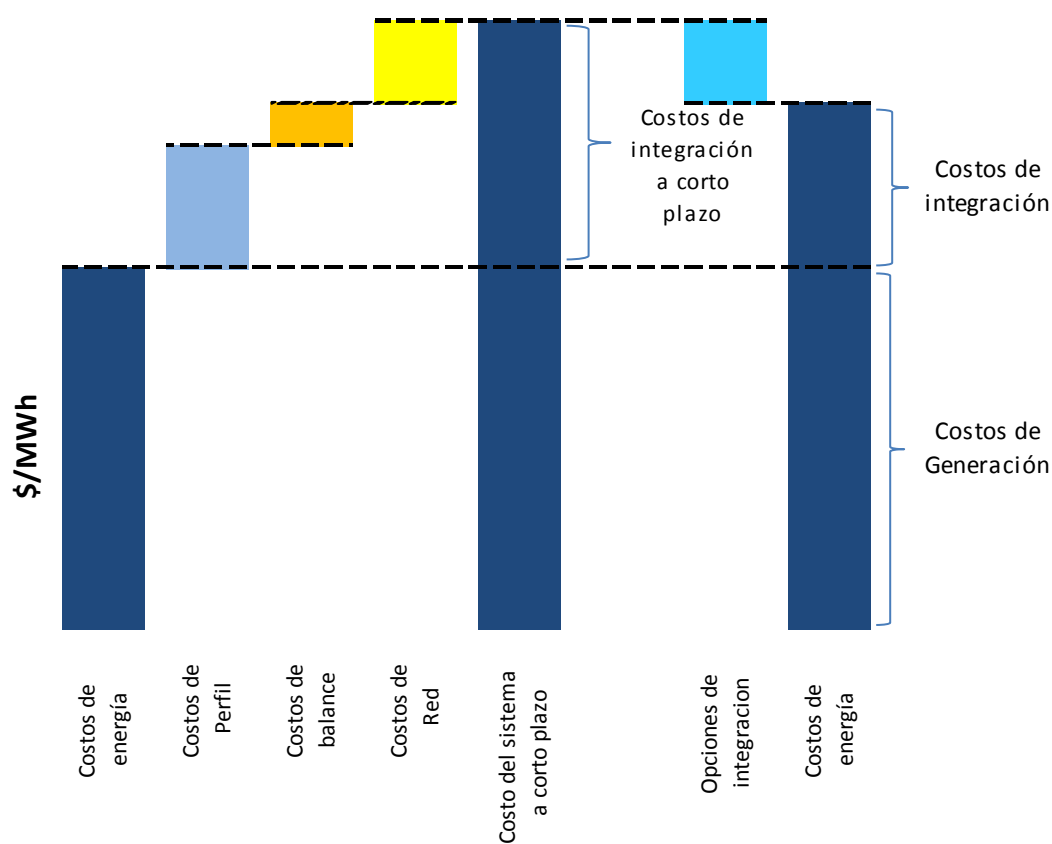


Figura 15. Costos de desarrollo y costos de integración

Fuente: Ueckerdt, 2013

3.3 Complementariedad de Generadores Flexibles y las ERNC.

Con el fin de determinar el mejor tipo de central para reserva fría confiable (RFC) se comparan centrales térmicas vs flexibles, esta comparación descubre interesantes datos técnicos como la diferencia de velocidad de operación de las unidades, porque mientras los motores de una central flexible operan a baja velocidad, otras unidades de generación como las térmicas lo hacen a mayores revoluciones por minuto, lo que implica un desgaste mecánico mayor. A manera de ejemplo, la velocidad de la unidad térmica es de 3.000 o 6.000 rpm; mientras que un Wartsila tiene una velocidad de < 500 rpm, por lo que despachar varias veces al día tiene un impacto considerable en el desgaste en los motores térmicos convencionales. Además, por ejemplo, en el caso de las turbinas se suma el hecho de que estas trabajan a mayor temperatura, por lo que estar respondiendo y operando en distintos regímenes de carga provoca un importante estrés térmico. En vista de ello, este tipo de soluciones más tradicionales requiere de un mayor mantenimiento y, por ende, incurrir en más gastos operacionales.

A nivel mundial, la tendencia se dirige hacia la incorporación de tecnología de generación flexible, particularmente como complemento a centrales de ERNC, con el fin de suplir la intermitencia de estas y asegurar el suministro continuo de energía, lo cual permite la firma de contratos a largo plazo.

Por otro lado, las centrales en base a energía eólica también pueden verse favorecidas por el trabajo conjunto con centrales flexibles altamente eficientes. Es así como en EE.UU. existen varios ejemplos de centrales eléctricas -con motores de mediana velocidad- que respaldan la energía de parques eólicos, como lo es una central eléctrica de 225MW en Oregón³⁷ que se configuró como uno de los últimos proyectos en este ámbito.

³⁷ <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=2500&edi=127&xit=generacion-flexible-una-tendencia-altamente-eficiente>

La Agencia Internacional de Energía (IEA, por su nombre en inglés) destacó en un informe Perspectivas 2014³⁸, el potencial de los motores de combustión interna como complemento para la generación en base a energía eólica y solar. Estas centrales eléctricas con motores de mediana velocidad son altamente eficientes y flexibles.

Se resalta la rapidez con que los motores pueden estar en operación, lo que sin duda ayuda a sostener la intermitencia de las plantas eólicas y solares. Dentro de este contexto, se hace énfasis en que las centrales con tecnología de motores de combustión interna son la mejor medida para acompañar y hacer viable la generación con este tipo de energías renovables no convencionales (ERNC), por sobre otras soluciones como— por ejemplo— las turbinas. Existen proyectos exitosos donde estas plantas flexibles tienen unidades con la capacidad de entrar en operación en 30 segundos y alcanzar su potencia máxima en tan sólo cinco minutos.

³⁸ <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyTechnologyPerspectives2014.pdf>

IV. ALTERNATIVAS PARA INTEGRAR LAS ERNCs AL SISTEMA DE POTENCIA.

4.1 Experiencia Internacional

La generación flexible cumple con los requisitos necesarios para ser generadores de reserva fría o rodante, tal como se expuso en la sección 2.6, puesto que, estos generadores amortiguan y reducen el impacto de las ERNCs en el sistema de potencia, (sección 3.2) y ayudarán a sobrepasar la barrera de participación máxima establecida en 24% - sección 3.1 - . Pero para ser considerada una opción realmente eficiente para integrar las energías renovables no convencionales al sistema de potencia de El Salvador, es importante que previamente exista una evolución del sistema de distribución, desde la red hasta los controles del operador.

Es difícil evaluar el impacto de la integración de ERNC donde fuentes como el sol y el viento son intermitentes, esto a nivel de generación y además, se hace más compleja la evaluación si consideramos la inminente evolución que inherentemente conlleva dicha integración al sistema eléctrico convencional. Esta alta variabilidad inherente, además de una predicción limitada, hace que sean denominadas como VRE (Variable renewable energy). En modestas contribuciones VRE a sistemas de potencia (bajo 5-10% de contribución con respecto al sistema en su totalidad), la variabilidad y la incertidumbre alcanzan niveles comunes para los operadores del sistema, pero a niveles de penetración mayores, es requerida una solución de integración para manejar los problemas asociados. Ejemplos claros de la variabilidad con VRE con gran índice de penetración se puede observar en la experiencia de Dinamarca la cual en enero del 2015, en tan solo 6 horas la generación eólica bajó 2000 MW (83% de la capacidad instalada)³⁹ y en el norte de

³⁹ Fuente: <http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno15/gas/eerr.html>

Alemania en diciembre del 2004, donde en 10 horas la generación eólica bajó 4000 MW (58% de la capacidad instalada)⁴⁰.

La experiencia internacional de países pioneros como Alemania, Suecia, Dinamarca, Francia y España, los cuales han avanzado significativamente en materia de generación no convencional, servirá de base para plantear las recomendaciones para el sistema eléctrico nacional.

Se describirá brevemente cada uno de los ítems fundamentales en los cuales se basa la integración de las ERNC's utilizando el estado del arte existente en países pioneros, donde se ha implementado y probado la tecnología. Estos países han desarrollado y ajustado modelos matemáticos de predicción de generación, reserva, modelos de transmisión y modelos de control, adicionalmente, se describirá el diseño de un centro de gestión especializado para cubrir las nuevas necesidades de generación intermitente considerando la generación flexible como reserva fría del sistema.

4.1.1 Actualización Tecnológica.

El rápido proceso de transformación en que se encuentra el mercado de la energía ha confrontado a los operadores de sistemas de transmisión de alta tensión con nuevas oportunidades y nuevos desafíos. La tecnologías de los sistemas eléctricos flexibles donde sensores, sistemas de procesamiento de señal y comunicaciones digitales permiten que la red sea observable, controlable y plenamente integrada, lo que significa tener operatividad total con los sistemas actuales y capacidad de incorporar nuevos actores energéticos sin afectar la seguridad y calidad del sistema, aun con la integración de las ERNCs a gran escala. Este cambio responde a la necesidad de asegurar la flexibilidad necesaria para realizar un despacho seguro y al mínimo costo posible, considerando y anticipándose a la variabilidad de las fuentes renovables de energía.

⁴⁰ Fuente: <http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno15/gas/eerr.html>

Es posible observar en la experiencia internacional, la siguiente tecnología:

a) **Sistemas estabilizadores del sistema de potencia** (Power System Stabilizer, PSS por sus siglas en inglés) con lectura de señales remotas no locales. Los PSS's tienen una mejor respuesta para mitigar los problemas de estabilidad, puesto que están mejor posicionadas en el sistema para observar la inestabilidad.

La función básica del PSS es agregar amortiguamiento a las oscilaciones del rotor controlando su excitación con señales estabilizantes adicionales. Otras señales de entrada a los PSS's son potencia eléctrica, la integral de potencia eléctrica, la potencia acelerante y la frecuencia en los terminales del generador.

La representación del PSS consiste de tres bloques:

- i. Bloque de compensación de fase. Rango de interés 0.1 a 2.0 Hz
- ii. Bloque 'signal washout'. Es un filtro con constante de tiempo lo suficientemente alta para permitir que señales asociadas pasen sin cambio.
- iii. Ganancia del estabilizador. Determina la cantidad de amortiguamiento introducido por el PSS, se subcompensa para mejorar la estabilidad transitoria.

b) **Uso de esquemas de protección especial**, incluyendo tecnología adaptativa y uso de control post-falla de redes híbridas (corriente alterna / corriente directa de alto voltaje) AC/HVDC por sus siglas en ingles. Esto incrementa la maniobrabilidad de los retiros y las inyecciones post-falla con el fin de evitar congestiones, problemas de tensión, estabilidad transitoria, etc. Con la posibilidad de eliminar estos problemas post-falla, es posible utilizar la infraestructura a un mayor nivel durante la pre-falla.

c) **Uso de equipos FACTS.** Los sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna, los llamados FACTS (Flexible AC Transmission Systems), tienen toda la capacidad que necesitan los operadores de redes de energía eléctrica para afrontar los retos que trae consigo un mercado energético en rápido cambio. Los sistemas FACTS están diseñados para superar las limitaciones de estabilidad, térmicas, de tensión y Flujos en bucle, de modo que el operador de la red pueda alcanzar sus objetivos sin necesidad de añadir nuevos sistemas.

Dado el carácter de los equipos electrónicos de alta potencia, la adopción de las soluciones FACTS estará justificada si la aplicación requiere uno o más de los siguientes atributos:

- i. Rapidez de respuesta
- ii. Variación frecuente de la potencia suministrada
- iii. Suavidad de regulación de la potencia suministrada

Son esencialmente esos atributos los que vincularon los FACTS con la generación flexible, puesto que, estos permiten realizar el ajuste de impedancias en modo correctivo. Esto permite desacoplar el control de flujo del control de consignas de las unidades de generación, ya que la configuración de flujos sobre la red se puede realizar mediante cambios en la impedancia de ciertos generadores de gran tamaño en lugar de un cambio en las inyecciones. Esto se puede realizar pre y post-falla, aumentando la flexibilidad del sistema y desacoplando a un mayor nivel los problemas de la red de las decisiones de despacho de las unidades de generación.

4.1.2 Predicción y Modelos Matemáticos.

La inclusión de modelos matemáticos fue inevitable por los problemas asociados con la predictibilidad y variabilidad de las fuentes como el viento y el sol. Estos generadores dependen de las condiciones climáticas y es ahí donde la modelación avanzada que se ha

desarrollado internacionalmente, contribuye y muestra claras ventajas sobre los sistemas de predicción utilizados actualmente por los operadores del sistema eléctrico.

Como requerimiento mínimo es necesario que con estos modelos matemáticos contribuyan a predecir los siguientes ítems:

- Determinar volúmenes y localización de la reserva mediante modelos probabilísticos, co-optimizando la producción de energía y reservas disponibles.
- Coordinar varias decisiones de potencia activa y reactiva; despacho de unidades de generación y equipos de red.
- Pronosticar generación ERNC (solar y eólica) con una visión sistémica a cargo del operador del sistema.
- Evaluar en intervalos horarios la determinación de reservas con el fin de reducir los errores de pronóstico.
- Reconocer el efecto de la presencia de varias tecnologías flexibles como FACTS y el almacenamiento de energía en baterías, en las decisiones de despacho económico, al igual que en las acciones correctivas ante fallas.

4.1.3 Transmisión y control.

Adicionalmente, se identifica dos puntos para reconocer el efecto de nuevas tecnologías en términos de Transmisión y Monitoreo, control y comunicación en las decisiones de despacho e integración de generación renovable. Esto incluye unidades de Medición fasorial (PMU) para incrementar la capacidad de hacer evaluación en línea de la seguridad, además, se identifica una necesidad de coordinar varias decisiones operativas no solamente entre las decisiones de reserva y despacho de las unidades, sino que también con otros sistemas como el sistema de gas (que puede incorporar más flexibilidad a la operación) o los sistemas de distribución eléctrica, reconociendo el efecto de la generación distribuida tanto en la oferta como en la demanda de servicios de reserva.

También es necesario desarrollar sistemas de control capaces que permitan:

- Realizar un pronóstico más adecuado de las necesidades de reserva, incluyendo su ubicación y coordinación con el despacho de energía.
- Realizar una operación del sistema eléctrico co-optimizada con la operación de generadores flexibles.
- Contar con una mayor visibilidad de los sistemas de distribución, lo que se transformará en una necesidad más importante a futuro dependiendo de los niveles de generación distribuida.

4.2 Generación Flexible como alternativa de integración de las ERNC's.

Conociendo la actualización necesaria en lo referente a tecnología, modelos de predicción, y la evolución del mercado eléctrico tal como se conoce para avanzar hacia un sistema eléctrico más flexible y de rápida respuesta, se hace notar en la experiencia de Alemania la inclusión de generadores de naturaleza flexible, los cuales como se acotó en la sección 2.6 poseen las características para complementar la generación intermitente y suavizar el efecto de la variabilidad de las ERNCs por su rápido tiempo de respuesta, lo que la convierte en una solución ideal.

Estas centrales eléctricas flexibles alcanzan valores de hasta 600 MW capaces de operar con diversos combustibles gaseosos y líquidos, y se han convertido en una opción para soluciones de generación para carga base, compensación de picos de demanda, reserva de potencia y seguimiento de carga; y para el caso en mención también son una opción para equilibrar la producción de las energías renovables intermitentes. Estos generadores al primer semestre del 2016 contaban con una capacidad instalada en centrales eléctricas de 60 GW⁴¹ en 176 países en todo el mundo.

⁴¹ Fuente: <https://www.wartsila.com/per/news/01-07-2016>

El panorama ideal debería basarse en centrales eléctricas formadas por varias unidades generadoras idénticas que funcionen en paralelo. El tamaño de cada uno de los generadores de estas centrales es limitado como para crear la suficiente flexibilidad en la producción y garantizar una alta disponibilidad.

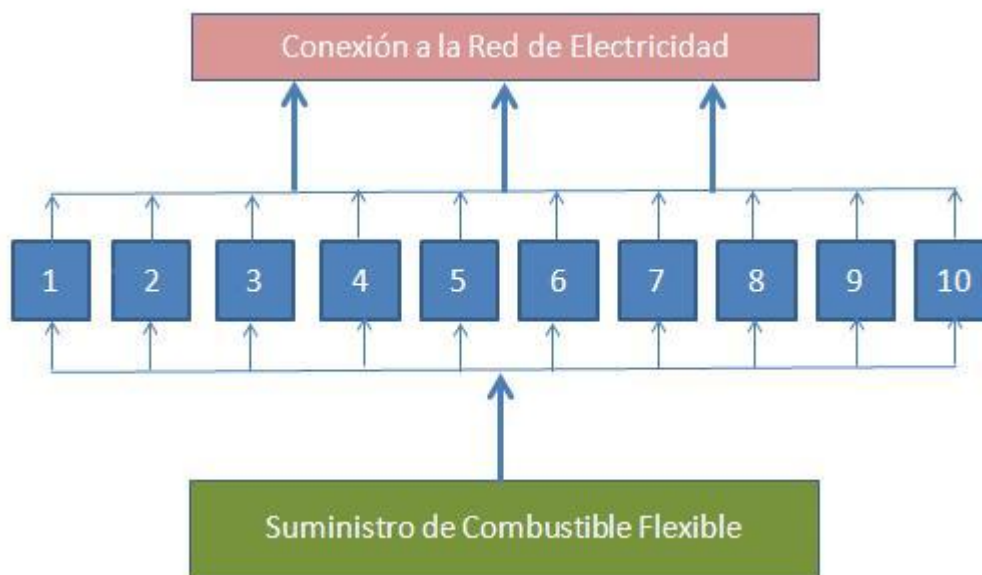


Figura 16. Diagrama de bloques de una Central Eléctrica flexible

Fuente: Elaboración Propia

La figura 16 muestra una central eléctrica flexible, compuesta por 10 unidades idénticas con conexión en paralelo, si se asigna un valor de 50 MW a cada unidad, esta central ideal podría suministrar 500MW al permanecer todas las unidades como RFC, o algunas unidades estar en línea mientras otras se comportan como reserva fría. Lo importante de esta central es que puede alcanzar su máxima capacidad en minutos permitiéndole seguir una falla en el pronóstico de demanda, del clima y el comportamiento del viento o el sol, suavizando el efecto de intermitencia y volviendo el comportamiento de todo el sistema eléctrico más estable.

Los costos de inversión de este tipo de centrales son relativamente bajos, dada la uniformidad y la producción en serie de sus unidades; por otro lado, el plazo de producción para el diseño, el abastecimiento y la construcción es corto, gracias a que las unidades son estandarizadas.

En estas centrales los costos de mantenimiento y la eficiencia del combustible son independientes de la producción de la central eléctrica, esto se debe a que los generadores pueden apagarse y encenderse sin que se reduzca el intervalo entre las labores de mantenimiento previamente programadas, al ser unidades estandarizadas el mantenimiento es sencillo por la estandarización de los procesos.

La agilidad de estos generadores de electricidad los hace adecuados para aliviar la carga del control de frecuencia y los aumentos y descenso rápidos de las centrales menos flexibles e intermitentes. Estas centrales pueden ofrecer las reservas primarias de forma casi inmediata que se necesita cuando la inercia del sistema está disminuyendo. También pueden proporcionar reserva secundaria no rodante. Estas ventajas pueden beneficiar el costo total de la producción de electricidad. En sistemas con una gran cantidad de fuentes renovables, los generadores inteligentes con gran capacidad de reacción ofrecen la solución óptima para mantener el sistema equilibrado de un modo accesible y viable.

La flexibilidad de la producción, eficiencia de combustible y costos de mantenimiento, convierten a la generación flexible en una solución real que se acopla a los requerimientos técnicos necesarios para integrar eficientemente las energías renovables no convencionales al sistema de potencia, como se describe en la tabla 5 puesto que son fácilmente administrables y no tienen inconvenientes operaciones o de disponibilidad con las condiciones climáticas, además con las unidades multifuel se minimiza el desabastecimiento de combustible, y esto acercaría más a El Salvador a la independencia energética.

4.3 Otras alternativas de integración de las ERNC's

Se consideran dos alternativas adicionales para integrar las ERNC's al SEP, como son el almacenamiento de energía, específicamente en baterías y la creación de centro especializado de energías renovables.

4.3.1 Almacenamiento de energía en baterías (BESS)

Los sistemas BESS por sus siglas en inglés (Battery Energy Storage System), están constituido por módulos de determinada potencia de un banco de baterías, agrupados típicamente en contenedores, y contiene un sistema de acondicionamiento de potencia, encargado de convertir la energía entregada por las baterías en AC para conectar a la red eléctrica o en DC cuando se requiera cargarlas.

Los sistemas de almacenamiento se pueden ocupar a lo largo de todas las etapas del sistema eléctrico, para el caso se evaluarán en la etapa de generación como sistema de regulación de frecuencia de los generadores intermitentes.

El sistemas BESS absorbe potencia cuando hay un incremento de la frecuencia (se carga) y análogamente, se inyecta potencia cuando hay una disminución en el valor de frecuencia (se descarga), esto se conoce como desplazamiento de energía.

El almacenamiento en baterías hace posible que las empresas productoras y de servicios puedan gestionar en alguna medida el suministro y la demanda de energía.

Para el Control de Frecuencia según ROBCP se requiere que la respuesta del sistema de almacenamiento de energía sea instantáneo y luego debe ser capaz de proveer regulación hasta 10 ó 15 minutos, para el cumplimiento de los tiempos de respuesta, el sistema BESS cumple con este requerimiento puesto que tiene la capacidad de inyectar al sistema eléctrico en un lapso de 20 ms las tecnologías más rápidas, esto significa mejoras en el desempeño de la regulación de frecuencia contra el control convencional.

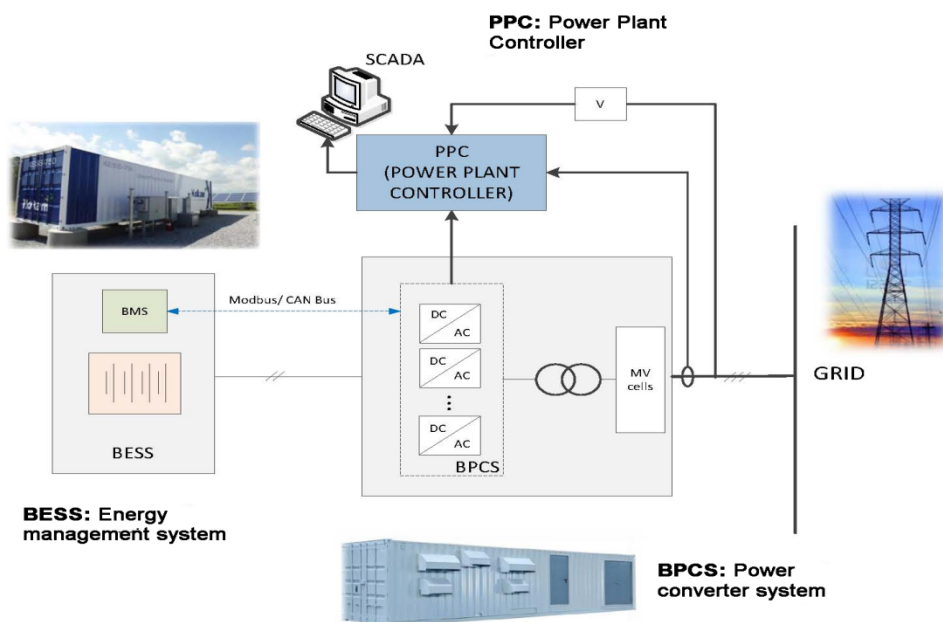


Figura 17. Componentes de un sistema BESS

Fuente: <http://www.greenpower.es/>

El sistema BESS proporciona regulación de frecuencia a los generadores de energía solar ante la incapacidad técnica de estas unidades de suministrarla, la intermitencia del recurso también provoca que no se pueda controlar cuando se despacha, y al existir picos de generación, probablemente ocurran cuando los costos marginales son bajos, y cuando son altos no se puede generar. Con el BESS cuando existe un excedente de energía de fuentes renovables, se puede almacenar y distribuirla en momentos de alta demanda. Con el apoyo de los sistemas de almacenamiento, se puede cargar cuando existe en el sistema una demanda baja, y descargar cuando se encuentra en horas de alta demanda, lo que puede mejorar el desempeño del parque generador, reflejado en su perfil de potencia, permitiendo un mayor control sobre su despacho económico.

Con este escenario, los sistemas de almacenamiento pueden gestionar la compra y venta de energía, de modo de puede comprar energía a bajos precios (se carga) y vendiendo a

altos precios (descarga). Para lograr esto se requieren sistemas de almacenamiento con largos números de ciclos (se requiere descargar y cargar constantemente) y que en lo posible sean de gran tamaño.

Dentro de las ventajas que posee el almacenamiento de energía en baterías, se encuentran:

- La disminución de los costos operacionales del sistema.
- Mejora la seguridad del Sistema durante contingencias.
- Reduce los costos de mantenimiento de la central.
- Mejora la eficiencia del generador, pues el generador estará operando cerca de su potencia nominal.

Dentro de las desventajas que posee el almacenamiento de energía en baterías, se encuentran:

- El exceso de energía eléctrica de los generadores fotovoltaicos es bajo, en algunos días incluso cero.
- Las baterías se deben reemplazar en el mediano plazo.
- Incrementa los costos de inversión de los proyectos de generadores renovables no convencionales.

Aun considerando las citadas desventajas, el sistema BESS es una alternativa para salvar cualquier limitación que sea consecuencia de la indisponibilidad técnica de algún generador, puesto que, si se obligara por ley a cada unidad generadora a proporcionar reserva regulante aunque técnicamente este inhabilitada, no solamente afectaría a los generadores renovables sino a todas las unidades que no pueden aportar esta reserva que requiere el operador del sistema a todos los generadores que inyectan a la red de transmisión⁴².

⁴² ROBCP anexo 2.1

4.3.2 Centro de Gestión especializado en ERNC.

Los generadores renovables no convencionales son afectados por las impredecibles condiciones ambientales y por la incertidumbre de predicción que esto implica, tal como se discutió en el capítulo III sección 3.2.1, esto crea intermitencia en la generación de energía eléctrica, lo cual convierte en una tarea compleja el integrar estos generadores al SEP de manera segura, especialmente cuando se hace de manera masiva.

En El Salvador para que los generadores solares y eólicos existentes y proyectados logren integrarse al sistema de potencia sin comprometer el correcto equilibrio entre producción y consumo, y además garantizar la máxima producción de energía de origen renovable, sin disminuir los niveles de calidad y seguridad del suministro eléctrico, es necesario además de complementar con generadores flexibles, administrar de forma eficiente a los generadores renovables y el monitoreo de las condiciones que los gobiernan. Pero el bajo factor de planta, la dispersión geográfica de los generadores, diversidad de tipos de plantas y la gran cantidad de información, se deben considerar a la hora de definir y diseñar un Centro de Control de fuentes variables.

Para cumplir con esto se propone la creación de un centro especializado en gestión de energías renovables no convencionales (CEGER), donde su mismo nombre lo indica este centro tendría como objetivo gestionar las ERNC's para integrarlas al sistema de potencia de El Salvador, en su máxima producción de energía renovable no convencional conservando condiciones de seguridad y calidad.

Descripción del CEGER.

Este centro se convierte en un nuevo actor en el Sistema Eléctrico Nacional, además, sería un interlocutor con el operador del mercado eléctrico, de esta manera se supervisa y controla la producción de las instalaciones de generación renovable. El CEGER sería el encargado de monitorear y actualizar la información de cada generador o grupo de

generadores en tiempo real, de controlar la producción de potencia activa y reactiva y la tensión en el nodo de conexión. Adicionalmente, toda la información que es captada por el operador del sistema, deberá ser accesible al operador del CEGER las 24 horas del día, todos los días del año, permitiendo realizar análisis en tiempo real del escenario actual, prever las medidas de operación necesarias para que el sistema se mantenga en un estado seguro y emitir, en caso de producirse una contingencias en el sistema, órdenes de limitación de la producción a las instalaciones de generación renovable no gestionable que deben cumplirse en menos de 15 minutos.

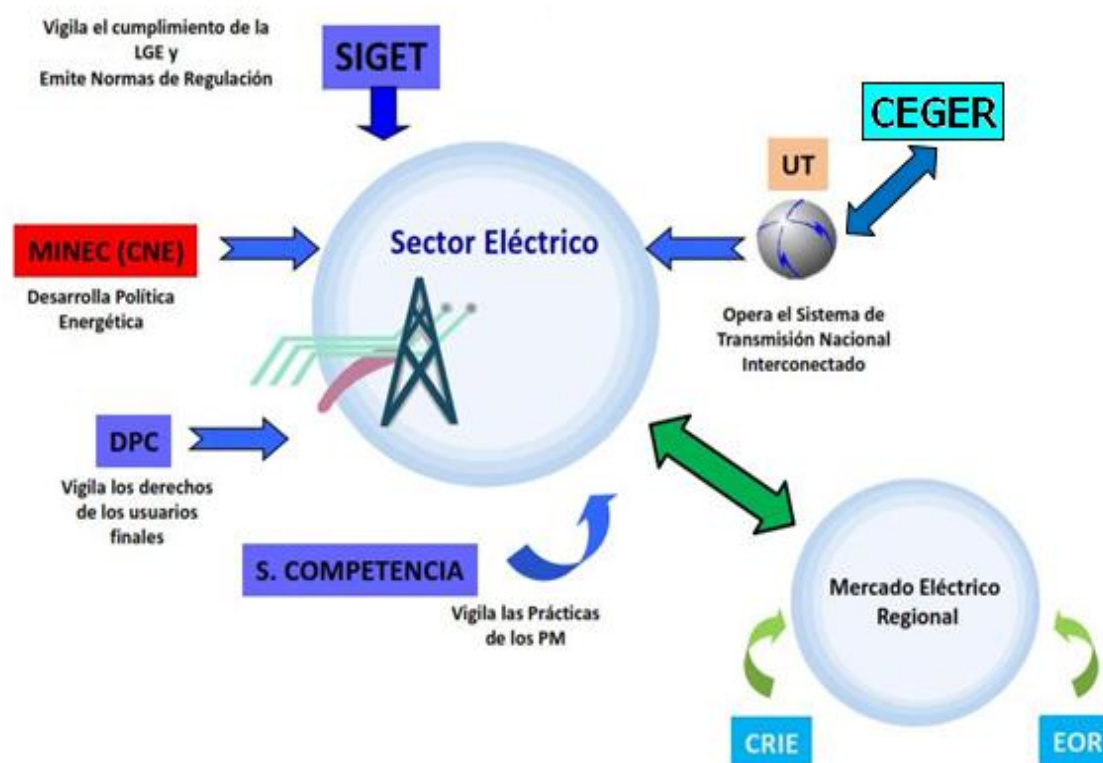


Figura 18. Estructura modificada del Sistema Eléctrico incluyendo el CEGER
Fuente: Material académico modificado, proporcionado en MGER

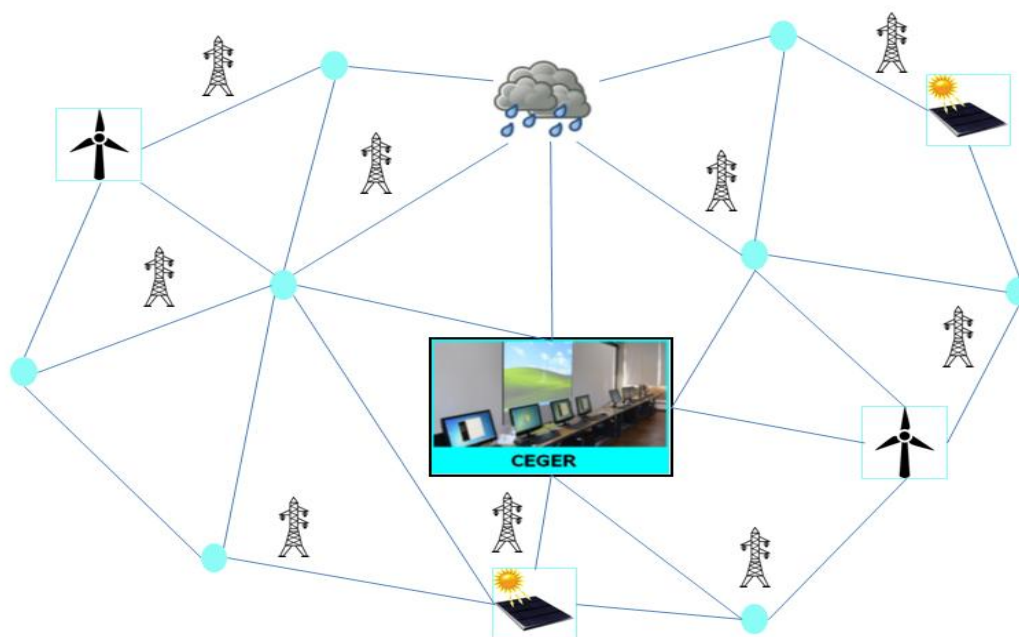


Figura 19. Interacción de CEGER y generadores
Fuente: Elaboración Propia

De este modo, desde el centro especializado se hace posible la integración creciente de energía renovable, permitiendo que la cobertura de la demanda pueda realizarse con energías renovables intermitentes, sin comprometer la seguridad y calidad del suministro.

Se consideran como principales funciones del CEGER:

- La Supervisión y control en tiempo real del funcionamiento de instalaciones de generación eléctrica de tecnologías renovables convencionales y no convencionales: eólica, fotovoltaica, termosolar, hidroeléctrica, biomasa y generadores flexibles.
- Operación de incidencias: detecta de inmediato las incidencias que se produzcan en cualquier instalación, lo que agiliza su corrección, bien en remoto o en coordinación con los servicios locales.

- Gestión de energía eléctrica: a partir de modelos propios de predicción, el centro envía al operador del sistema (UT) miles de programaciones de producción al año.
- Interacción con el Operador del Sistema: el CEGER envía a la UT datos en tiempo real de cada instalación de generación, lo que permite al operador calcular la producción eléctrica integrable y maximizar la penetración de las energías renovables en el sistema.
- Registro de datos y análisis: registra y analiza la información operativa, para optimizar la eficiencia de las instalaciones, y opera las subestaciones y líneas de alta tensión, para garantizar la evacuación de la energía.
- Administrar los modelos que permitan optimizar tanto el despacho de potencia activa como reactiva de forma conjunta, con el fin de capturar en los modelos de despacho el efecto de nuevas tecnologías, incluyendo el almacenamiento de energía BESS como reserva de potencia de las ERNC's. El CEGER administraría la energía almacenada ya sea proyecto de almacenamiento exclusivo como el caso de En el UK⁴³ o como un sistema de almacenamiento pertinente a cada generador ERNC.

Esta función del CEGER podría evolucionar en un mercado de reserva regulante por ley definido, donde en el mercado MRS además de energía se incluya en la bolsa del mercado las reservas de cada unidad generadora, esto implicaría separar la energía de la reserva cuando se casa oferta con la demanda y la casación solo sería válida cuando todas las unidades en despacho casen la reserva necesaria del bloque de unidades generadoras. La aplicación de este modelo resultará en la definición de precios

⁴³ Artículo de Smartgrids <https://www.smartgridsinfo.es/2017/05/19/enel-adquiere-proyecto-almacenamiento-energia-baterias-reino-unido>

nodales de energía y reserva de potencia activa, modificando inevitablemente los precios de la energía.

El CEGER llevara al SEP a una estructura más compleja, pero ese cambio la AIE ya lo plantea en la revista Energy Technologies Perspectives 2014, como un esquema de red eléctrica inteligente donde especifican que para convertirse en un sistema eléctrico más flexible inevitablemente incrementará su complejidad, como se observa en la figura 19.

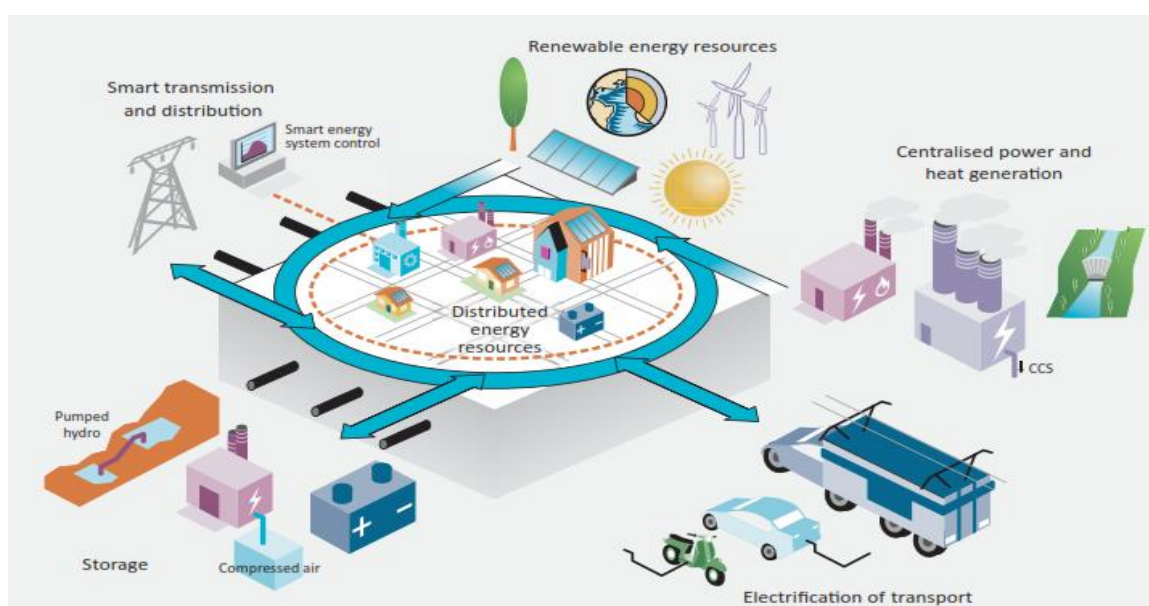


Figura 20. Sistema eléctrico Inteligente
Fuente: Revista Perspectivas Tecnológicas, AIE, 2014

Esta transición hacia redes eléctricas más flexibles, conllevan un incremento en la complejidad total del sistema, lo cual es necesario debido a la incorporación de nuevas variables, actores y participantes del mercado, todo esto con el afán de integrar a gran escala las ERNC's más allá del límite que la condición actual del SEP acepta sin riesgo y permitir evolucionar a redes eléctricas donde es posible alcanzar niveles de hasta el 50% de energías renovables no convencionales.

Item	ALTERNATIVA DE INTEGRACION	Costos Bajos de implementación	Reducción de costos operacionales del generador RNC	Reducción de costos de mantenimiento del generador RNC	Mejora la eficiencia del generador RNC	Proporciona Reserva Primaria al SEP	Proporciona Reserva Secundaria al SEP	Mejora la seguridad del SEP	Afectada por condiciones climaticas
1	Generacion Flexible	x	x	x	x	x	x	x	
2	Almacenamiento de Energia en Baterias		x	x	x	x			x
3	Centro Especializado de Energias Renovables		x	x	x				

Tabla 5. Comparación de alternativas de integración

Fuente: Elaboración propia

4.4 Marco Regulatorio

Para integrar las ERNC'S al SEP fue necesario evaluar el marco regulatorio existente en El Salvador, y la creación del mercado basado en costos de producción se facilitó la integración inicial de las energías renovables, fue con este cambio de mercado donde se modificó el marco regulatorio y creo la condición actual, pero es momento de una nueva evaluación para preparar al SEP para la integración a gran escala de las ERNC's.

Se evaluará el marco regulatorio desde la condición actual y las reformas necesarias para permitir la inclusión de los nuevos esquemas.

4.4.1 Marco Regulatorio Existente.

A continuación se cita la condición actual en lo referente a las alternativas para integrar de las ERNC.

i. **Promover Políticas que fomenten las ERNC's**, En la sección 2.5 se observan los avances como país. El salvador cuenta con procesos de licitación pertinentes a unidades ERNC's. Desde la creación del Consejo Nacional de Energía (CNE)⁴⁴ en el 2007, se han desarrollado desde el seno de esta institución las acciones para crear y fortalecer la Política Nacional de Energía, modificar la operación del mercado por la incorporación de las unidades renovables no convencionales y fomentar los proyectos de naturaleza con la ley de incentivos fiscales.

En el 2009 se modifica la operación del mercado mayorista y se crea el ROBCP donde las unidades renovables tiene prioridad de despacho⁴⁵.

ii. **Definir los costos**. Con un mercado eléctrico basado en costos de producción se definen claramente los costos de combustible y de operación, pero como se mencionó en la sección 3.2.1, no basta con definir cuanta capacidad de generación ERNC se

⁴⁴ Sitio web CNE www.cne.gob.sv

⁴⁵ Decreto ejecutivo No 80

establecerá como meta sino cuándo ocurrirá y como dichos aportes de generación logran abastecer la demanda del sistema y cuáles son sus costos, dado que los aportes de dichas centrales no son gestionables. En este respecto, se destaca que los sobrecostos de las ERNC son manejables y posibles de acotar, como es el caso de los costos por pago de reserva regulante, definidos claramente en el capítulo segundo, sección 2.4.1 de este trabajo.

- iii. **Implementar y promover el Multicarrier Eléctrico.** Mediante este mecanismo los consumidores podrían elegir la fuente de suministro eléctrico, priorizando ERNC si esa fuera su elección.

El mecanismo permite que aquellos consumidores que estén dispuestos a pagar más por energía ERNC tengan la opción de hacerlo. En esta dirección, la minería y otras industrias necesitan bajar su huella de carbono por lo que tenderán a contratar más ERNC. Además, la separación de la comercialización del uso de las redes de distribución podría apoyar este tipo de elecciones también en pequeños consumidores (sector residencial o comercial) y fomentar aún más las ERNCs en un contexto competitivo.

Este sistema opera desde hace varios años en Europa, siendo un ejemplo la exitosa experiencia de Francia⁴⁶.

En El Salvador las empresas distribuidoras poseen un monopolio natural por la distribución geográfica de cada una, sin embargo, la LGE establece que “los usuarios finales podrán negociar con cualquier comercializador, los precios y condiciones del suministro de energía eléctrica⁴⁷”; lo que implica que existe la normativa para acceder al multicarrier eléctrico en El Salvador, es decir, se podría elegir entre distintos tipos de energía a las distribuidoras y dependerá de la preferencia del usuario final si

⁴⁶ Fuente: <http://comparateur-offres.energie-info.fr/>

⁴⁷ Artículo 82, LGE

selecciona una fuente convencional o un no convencional, aunque esto implique costos adicionales.

El multicarrier se convertiría en un aspecto adicional de fomento a las energías renovables no convencionales.

iv. **Políticas de promoción de centrales hidroeléctricas de embalse.** La integración a gran escala de generación intermitente exige mayor flexibilidad en el resto de la operación del sistema para ajustar la oferta con la demanda ante cambios en la producción de renovables no convencionales.

Los factores de planta de unidades hidroeléctricas de embalse son complementarios con las eólicas y solares, por lo que pueden disminuir los costos de ciclado de centrales térmicas y han sido claves en la integración eficiente de las ERNCs al SEP a la fecha. Esto se convierte en una fortaleza como país puesto que el 22.9% de la matriz energética nacional es hidroeléctrica, esto sin cuantificar los proyectos que actualmente están en desarrollo.

4.4.2 Desafíos Regulatorios.

Para implementar cada una de las alternativas propuestas para integrar las energías renovables no convencionales de manera eficiente al SEP, es necesario realizar modificaciones al marco regulatorio existente, se abordará por separado cada alternativa.

a) **Generación Flexible.**

Para el caso de la generación flexible como reserva rodante, se reconocerá según lo discutido en la sección 2.4, es decir los cargos resultantes serán pagados por el PM generador que requiera la reserva.

La entrada en operación de las unidades flexibles para el control de tensión se considerará generación obligada, así como los costos de arranque y la inyección de energía al

sistema⁴⁸, pero no será remunerado como generación obligada cuando reemplace⁴⁹ en su totalidad a generadores ERNC's.

Se considera que el ingreso de forma intermitente al SEP genera costos adicionales por el ciclado de las unidades pero esta intermitencia costo no afecta a las unidades, puesto que, tienen la capacidad de toma y rechazo de carga sin ver disminuida su eficiencia ni incrementada la frecuencia de mantenimientos, tal como se acoto en la sección 3.3.

b) Almacenamiento de Energía en Baterías (BESS).

El sistema BESS da respuesta a la obligación de todas unidades que inyectan al SEP de proporcionar reserva primaria⁵⁰. El BESS puede proporcionar la estrategia de control primario de frecuencia de los generadores no convencionales.

El tiempo de respuesta de los inversores de potencia es de 20 ms (aproximadamente 1 ciclo) y el ROBCP refiere que el tiempo de liberación de la falla por protección primaria debe ser no mayor a 60 ciclos (1 s)⁵¹, lo que implica que el tiempo de respuesta no es limitante para esta alternativa. Con respecto a la eficiencia de conversión las nuevas tecnologías ofrecen valores del 97%⁵².

El BESS no posee una tasa de carga en vista que no tiene respuesta inercial por ser un sistema de almacenamiento electro-químico, pero tiene la capacidad de entregar de forma instantánea la energía almacenada, desde 10 segundos hasta horas⁵³ con una eficiencia del 50 al 92%. Esta eficiencia es determinante para considerar la potencia del sistema, como ejemplo si se considera el 50% como eficiencia, y el ROBCP establece que para ser

⁴⁸ ROBCP, Anexos 12, sección 12.3.8.5

⁴⁹ ROBCP, Anexos 13, sección 13.7.2

⁵⁰ ROBCP, Anexo 11, sección 2.1

⁵¹ ROBCP, Anexo 12, sección 6.2.4

⁵² Especificaciones técnicas, www.greenpower.es/es/solucionesgptech/productos/gptech_pps/#!tab3

⁵³ Fuente, http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642014000200020

considerado PM generador y conectarse al SEP deberá cumplir con la potencia mínima requerida de 5MW⁵⁴ significa un sistema BESS de 10.0 MW sin considerar pérdidas de acondicionamiento de voltaje.

Las especificaciones del almacenamiento de energía deberán incluirse en ROBCP en capítulo 6 para determinar el cálculo de potencia firme del banco de baterías, en el capítulo 12 definir el almacenamiento de energía como reserva regulante y los requerimientos técnicos en el anexo 11 de servicios auxiliares.

c) Centro Especializado de Gestión de Energías Renovables.

Este centro será un administrador más en el sector eléctrico, enfocándose en las unidades de generación no convencionales, convencionales y los generadores que posean respaldo BESS o unidades exclusivas de almacenamiento.

Siendo administrativa la naturaleza del centro especializado, este no se concibe como centro autónomo adicional al sistema eléctrico sino que se diseña como parte de la Unidad de Transacciones. Bajo esta premisa para crear el CEGER será necesario reforzar el Cargo por la Operación del Sistema de Transmisión y Administración del Mercado Mayorista (COSTAMM) expresado como \$/MWh.

El artículo 39 de LGE establece que “La UT cobrará los cargos por la operación del sistema de transmisión y del mercado mayorista de acuerdo con el método establecido por la SIGET. Estos cargos deberán permitir a la UT obtener ingresos suficientes para satisfacer los costos operativos razonables aplicables al servicio”, bajo este artículo es posible la gestión de un incremento en el cargo por la creación del CEGER, con base en el supuesto que es un centro de administración de recursos renovables.

Con el centro especializado adscrito en la UT, el sistema eléctrico de potencia percibiría un incremento en el cargo ya existente más no un cargo nuevo por la creación del centro.

⁵⁴ ROBCP, Anexos 20, sección 20.1.2

ALTERNATIVA	DESCRIPCION	EXISTENTE	DESAFIOS	OBSERVACIONES
Generación Flexible.	Regulacion para reserva rodante	ROBCP, seccion 12.4; 12.5	--	La generacion flexible se integra al SEP como un PM generador, existen todas las condiciones para implementarse
	Especificaciones tecnicas	ROBCP, anexo 11	--	
	Costos asociados	ROBCP, anexo 12	--	
	Potencia Firme	ROBCP, seccion 6	--	
Almacenamiento de Energía en Baterías (BESS).	Regulacion para reserva rodante	--	Reformar el ROBCP, Capitulo 12	Se debe tipificar el BESS como RP
	Especificaciones tecnicas	--	Reformar ROBCP, anexo 11	Se deben incluir requerimientos tecnicos
	Costos asociados	ROBCP, anexo 12	--	
	Potencia Firme	--	Reformar el ROBCP, Capitulo 6	Se debe incluir el calculo de potencia firme para el BESS
Centro Especializado de Gestión de Energías Renovables.	Regulacion para reserva rodante	--	--	No Aplica
	Especificaciones tecnicas	--	Refuerzo presupuestario a la UT	Creacion, equipamiento y puesta en marcha del Centro
	Costos asociados	--	Incrementar el COSTAMM	Se considera una unidad adscrita a la UT
	Potencia Firme	--	--	No aplica

Tabla 6. Marco Regulatorio y Desafíos de regulación

Fuente: Elaboración propia

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La inclusión a gran escala de energías renovables no convencionales al Sistema de Potencia de El Salvador está en marcha desde abril de 2017 y en abril de 2018 proyectos eólicos se espera que se sumen a la matriz energética. Si se consideran además los generadores fotovoltaicos con conexión a red distribuidos que a la fecha ya existen en el país, el porcentaje de inclusión de energías renovables no convencionales estará limitada por la reserva rodante disponible, lo que significaría en el corto plazo que el sistema de potencia de El Salvador ya no tendría capacidad de incorporar nuevos generadores de fuentes intermitentes como el sol o el viento. A junio de 2017 el sistema de potencia cuenta con 165.8 MW de reserva operativa rodante pero 47 MW corresponden a máquinas térmicas, las mismas que será desplazadas en los horarios de generación de las energías no convencionales, y aunque estos generadores pueden contratarse como reserva fría confiable, estos no están diseñados para trabajar de forma intermitente, y este ciclo de trabajo les ocasionará inevitablemente mayores costos en el mantenimiento de estas unidades, y el inevitable efecto cascada en los precios de la energía eléctrica.
- El proyecto en construcción a gas natural de 355 MW de potencia y su energía asociada, capítulo II sección 2.5.1, modificaría las condiciones de flexibilidad del sistema de potencia, al convertirse en una alternativa de reserva fría confiable, por lo cual tras su puesta en marcha en el 2020 (según proyecciones) es posible que beneficie la integración a gran escala de las energías renovables no convencionales, por lo cual es necesario actualizar el estudio de penetración confiable de energía renovable considerando como carga base la generación de 355 MW, una vez se haya definido las características técnicas de las unidades a instalar en esta planta.

- Como en el ROBCP se obliga a que un 7% de la potencia máxima de las centrales sirvan para proveer reserva rodante (considerando reserva primaria y secundaria) con los proyectos de almacenamiento de energía en baterías como reserva de potencia es posible aumentar la generación de las unidades que proveen la reserva, puesto que sus obligaciones de reserva en giro se cubrirían con la planta de almacenamiento de energía, incrementando el factor de planta de estas unidades, aumentando la capacidad de generación de las unidades de reserva.
- En consideración que las reservas serían monitoreadas desde el centro especializado, la separación del mercado de energía y mercado de reservas podría considerarse y dar lugar a un mercado independiente de servicios auxiliares exclusivo de reservas, donde más unidades proporcionen esta reserva y así abrir el mercado de regulación. El diseño de este mercado de reservas se recomienda como una futura línea de investigación.
- Actualmente el porcentaje calculado de penetración de las energías renovables no convencionales es 24%, con el desarrollo de la alternativa de generación flexible se hace necesario el desarrollo de un nuevo estudio que determine y actualice este índice de penetración y así trazar las nuevas líneas para el desarrollo de las energías renovables en El Salvador, una vez se hayan definido las características técnicas de las unidades de generación flexible a instalar.
- Los generadores flexibles se integrarían al sistema de potencia como reserva fría confiable, estas unidades proporcionarían reserva primaria y secundaria al SEP, por su velocidad de respuesta se convierten en el complemento de la generación renovable no convencional contribuyendo a regular la frecuencia por la salida intermitente de estas unidades de generación, esto sin afectar sus costos de mantenimiento por el ciclado de las unidades, adicionalmente los generadores flexibles tiene la capacidad

de incorporar unidades para soportar la pérdida de potencia por contingencias, aumentando así la seguridad del sistema de potencia.

Tienen como beneficio adicional que sus costos de inversión son relativamente bajos y su construcción es corta, esto como efecto de ser unidades de generación estandarizadas.

Por las bondades descritas se hace notar que la generación flexible es la mejor alternativa para integrar las energías renovables no convencionales al sistema eléctrico de potencia de El Salvador.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- [1] CNE. (2014) Informe del plan de expansión 2012 - 2026. El Salvador, San Salvador.
- [2] CNE. (2011) Plan Maestro para el desarrollo de las energías renovables en El Salvador. El Salvador, San Salvador.
- [3] G.I.Z.; MPE (2013) Analysis of the Impact of the integration of 100MW of Non-Conventional Renewable Energy (PV/ Wind) on the Spinning Reserve of the Electrical System of El Salvador
- [4] USAID (2015) Análisis del desempeño de la reserva rodante del sistema eléctrico de potencia de El Salvador ante la integración de energías renovables no convencionales (eólica y solar fotovoltaica). El Salvador, San Salvador.
- [5] IEEE SA 519, Harmonics (2014), Se encuentra en:
<https://standards.ieee.org/findstds/standard/519-2014.html>
- [6] Agencia Internacional de energía (estadísticas 2016), Matriz energética mundial,
<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyElectricityTrends.pdf>
- [7] Artículo sobre Wartsila (diciembre 2016), Se encuentra en:
<http://smartgridspain.org/web/wartsila-suministrara-una-central-electrica-flexible-cogeneracion-100mw-alemania/>
- [8] PROESA CNE (2015), Informe del Sector Eléctrico.

[9] PROYECTO SWERA (2005), Determinación del potencial solar y eólico de El Salvador, Proyecto Swera.

[10] UNIVERSITY OF COLOGNE, Nicolosi, Marco Ph.D. thesis (2012), The Economics of Renewable Electricity Market Integration.

[11] PÉREZ-ARRIAGA, I.J., BATLLE, C. (2012), Impacts of intermittent renewables on electricity generation system operation, Economics of Energy & Environmental Policy.

[12] THE ECONOMIST. (2013, Julio), Renewable energy in Spain: The cost del sol. The Economist. Se encuentra en: <https://www.economist.com/news/business/21582018-sustainable-energy-meets-unsustainable-costs-cost-del-sol>

[13] USAID- TETRA TECH, (Junio 2015) Análisis del desempeño de la reserva rodante del sistema eléctrico de potencia de El Salvador ante la integración de energías renovables no convencionales (eólica y solar fotovoltaica)

[14] ELECTRICIDAD, Revista Chilena (marzo 2014), Motores de combustión interna. Se encuentra en: <http://www.revistaei.cl/2014/06/03/>

[15] Informe de capacidad firme definitiva, junio 2017

[16] Generación Flexible, se encuentra en:
<http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=2500&edi=127&xit=generacion-flexible-una-tendencia-altamente-eficiente>