

Propuestas para el mejoramiento de la sostenibilidad del sistema de generación de energía eléctrica de Venezuela. Un enfoque basado en el despliegue de la generación distribuida con tecnologías limpias*

Proposals for the Improvement of the Sustainability of the Venezuelan Electric Power Generation System. An Approach Based on the Deployment of Distributed Generation with Clean Technologies

Juan Carlos Rojas-Zerpa[‡], Gabriel Jaime Correa-Henao[†]

Resumen: En esta contribución técnica se realiza una evaluación de los impactos ambientales adversos inherentes a la generación de energía del sistema eléctrico venezolano, referido a las fuentes primarias de generación y sus efectos en términos de emisiones GEI (CO₂eq), emisiones acidificantes (SO₂) y eutroficantes (NO_x), con la finalidad de identificar otras fuentes de energías (limpias) que permitan el despliegue de la generación distribuida y, en consecuencia, mitigar los efectos del calentamiento global, prevenir la contaminación ambiental e impulsar la generación de empleo. La caracterización y cuantificación de los impactos ambientales están basadas en el análisis del ciclo de vida de las fuentes de suministro (ACV), donde se analizan los impactos desde la extracción de los materiales hasta el desmantelamiento de las tecnologías. Los resultados indican que el mayor

impacto ambiental ocasionado por las fuentes y tecnologías del sistema de generación de energía eléctrica del país se relaciona con las emisiones GEI (en proporción a la masa). Dicha evaluación se aplicó en un caso de estudio enfocado en la producción de energía eléctrica en el sistema venezolano, teniendo en cuenta que durante el año 2012 se realizó una emisión anual de 33,4 M Ton CO₂eq desde Venezuela, siendo este el valor más alto de los últimos 12 años, relacionado con la generación de energía eléctrica. Esta cantidad de emisiones representa menos del 16 % del total del CO₂ que emite anualmente el país. La sustitución de las tecnologías convencionales basada en los combustibles fósiles: fuelóleo, gasóleo y gas natural, es técnicamente factible mediante el uso de tecnologías renovables, tales como: energía eólica, energía solar fotovoltaica y mini-hidráulica,

* Artículo resultado de investigación.

□ PhD en Energías Renovables, Universidad de los Andes (ULA)-Escuela de Diseño Industrial, Mérida, Venezuela. juancrojas@ula.ve

† PhD en Ingeniería Eléctrica. Líder Electromecánico, Sedic S.A, Medellín, Colombia. gjcorrea@gmail.com

entre otras. Para el 2020, la combinación de tecnologías de generación distribuida de origen renovable permitiría favorecer la sustitución del 100 % del fuelóleo y gasóleo. Los beneficios socio-ambientales implicarían una reducción de emisiones GEI superior al 83 %, así como una reducción significativa en las emisiones de SO₂ y NO_x. Estos indicadores demuestran la posibilidad de alcanzar la sostenibilidad ambiental del sector y la posibilidad de aplicarlo en países de la región de América Latina y el Caribe (ALyC).

Palabras clave: Matriz energética, Generación distribuida, Sostenibilidad energética

Abstract: This technical contribution shows an environmental-based assessment, taking into account adverse environmental impacts that are inherent to energy generation into Venezuelan electrical system, as referred to both primary fuels and effects in terms of GHG (CO₂eq), acidifying emissions (SO₂) and eutrophication (NO_x). This is done by identification of other sources of clean energy that may boost distributed generation with benefits on mitigation on the effects on global warming, as well as prevention of environmental pollution and job creation. The characterization and quantification of the environmental impacts is based upon the analysis of the life cycle of several energy sources, by keeping into account impacts related to materials extraction and dismantling of technologies. These results indicate that the greatest environmental impact caused by the sources and technologies of the country's electric power generation system is related to GHG emissions (in proportion to the mass). This evaluation is applied in a case study focused on the production of electric energy in the Venezuelan system, taking into account country's emissions of 33,4 MT CO₂eq in 2012, which has been the highest value over last 12 years, related to the generation of electric power. This amount of emissions represents less than 16% of the total CO₂ that the country emits annually. The replacement of conventional technologies based on fossil fuels (fuel oil, diesel, natural gas), is technically feasible through the use of renewable technologies, such as: wind energy, solar photovoltaic and mini-hydraulic, among others. By 2020, the combination of distributed

generation technologies of renewable origin would favor the replacement of 100% of fuel oil and diesel. The socio-environmental benefits would imply a reduction in GHG emissions of more than 83%, as well as a significant reduction in SO₂ and NO_x emissions. These indicators demonstrate the possibility of achieving environmental sustainability of the sector and the possibility of applying it in neighboring countries in Latin America and the Caribbean.

Key words: Energy Mix, Distributed Generation, Energy Sustainability

Introducción

Las actividades diarias de los habitantes de todas las sociedades están relacionadas con el uso de dispositivos, equipos o medios que implican el consumo de electricidad y otros combustibles. Sin embargo, la mayor parte de esa energía que proviene de fuentes no renovables y que es consumida por la sociedad moderna, ha requerido centenares de millones de años para su depósito en mantos geológicos. Dicha energía se consume desde los últimos 150 años a una escala tan impresionante, que ahora la humanidad se enfrenta a dos grandes problemáticas: el efecto invernadero y el agotamiento de los recursos fósiles (Fuel-cell, 2009).

Además, el intenso crecimiento poblacional del planeta está provocando la demanda insostenible de bienes y servicios, con consecuencias adversas para los recursos naturales, cuya existencia es finita. En efecto, la atmósfera recibe la inyección continua e intensiva de los gases causantes del efecto invernadero (GEI), además de otras sustancias contaminantes, los cuales están amenazando la estabilidad climática del planeta (Balasano, 2007). Al CO₂, el más importante de estos GEI, se le atribuye el 76 % del efecto invernadero (IPCC, 2014), cuyas emisiones mundiales provienen principalmente de la generación de energía eléctrica y calor (25,0 %), la agricultura, silvicultura y otros usos del suelo (24,0 %), la industria (19,0 %), transporte (14,0 %), edificaciones (6,0 %) y otros usos energéticos (10,0 %) (IPCC, 2014). Por otro lado, los inventarios de recursos fósiles revelan que el petróleo (35 % de la energía primaria mundial)

acabará agotándose, además su producción está muy localizada y precisamente es escaso en los países con mayores niveles de consumo (De Juana, 2003).

En los próximos años se prevé, que la situación sea más compleja. La gestión de recursos finitos y escasos supone una dificultad cada vez mayor, con un creciente consumo de energía y un cambio en los modelos de producción (ESPAS, 2016). De hecho, si los gobiernos del mundo mantienen sus actuales políticas y modelos de desarrollo económico, las necesidades energéticas mundiales en 2040 serán un 30 % más elevadas respecto a los niveles del 2017 (AIE, 2017). Ese aumento, motivado por el crecimiento natural de la población y por un mayor poder adquisitivo de los consumidores de algunos países (principalmente de Asia), significa un consumo de todos los combustibles modernos, cuyas emisiones de CO₂ se incrementarán significativamente. Ese incremento en el consumo de energía, el 93 %, se producirá en los países no pertenecientes a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) (ESPAS, 2016) y más de la mitad se atribuyen a China e India (BP, 2017). A nivel mundial, se espera que la demanda de electricidad se incremente aproximadamente en un 70 % de aquí al 2035, donde China e India serán determinantes (UNESCO, 2014). Para el 2040, se estima que alrededor del 40 % del incremento de la demanda global de energía primaria corresponde con la producción de energía eléctrica (AIE, 2016), con lo cual una gran parte de ese nuevo incremento estará asociado a los combustibles fósiles.

En 2004, la industria de la generación de energía eléctrica fue la primera causa, a nivel mundial, responsable de las emisiones GEI (IPCC, 2007). En la actualidad, dicha tendencia no ha cambiado (WEC, 2014). Esta consideración es fundamental para que en los futuros proyectos de suministro eléctrico, los agentes de decisión y planificadores estudien alternativas que generen mínimos impactos ambientales, garantizando de esta manera, el reconocimiento de las tecnologías que favorezcan un mejor aprovechamiento de los recursos energéticos para satisfacer las necesidades locales de electricidad y desarrollo.

Para estabilizar las emisiones causantes del calentamiento global, lluvia ácida y eutrofización es necesario identificar los impactos ambientales que se derivan del uso de las fuentes y tecnologías de generación y suministro de electricidad. La evaluación de estos impactos, mediante análisis de ciclo de vida (ACV), permite identificar las causas que pueden generar daños al ambiente y a la sociedad, por las diferentes formas de producir la energía, ya sea a través de las tecnologías de conversión que involucran el consumo de combustibles fósiles o de las energías renovables.

El contenido de la presente contribución técnica abarca los principales aspectos inherentes al sistema eléctrico venezolano, la cuantificación de los efectos ambientales adversos debidos a la generación de energía eléctrica en el país y la discusión de las alternativas para mejorar la sostenibilidad del sector, que implica la sustitución de fuentes fósiles por renovables para el año 2020.

Caracterización del sistema eléctrico venezolano, año 2012

En Venezuela, la información disponible del sector eléctrico, petróleo, gas natural y otras fuentes de energías no está actualizada. De hecho, la información disponible (oficial) en medios web es del 2013 con datos del 2012.

El sector de generación de energía eléctrica del país está subdividido principalmente en dos grandes grupos: hidroeléctrico y los sistemas termoeléctricos. Estos sistemas están distribuidos de acuerdo con las zonas geográficas de mayor densidad poblacional. Las redes eléctricas surten la energía centralizada a lo largo del arco andino-costero (redes 100-140kV; 151-245kV; 246-480kV y mayores de 480KV), como se muestra en la figura 1. En la actualidad (2016), el nivel de electrificación en áreas urbanas es 99,0 % y en las zonas rurales es ligeramente inferior (98,0 %) (AIE, 2017). Cabe destacar que los niveles de electrificación de Venezuela son relativamente elevados, si se compara con los niveles alcanzados en América del Sur donde el promedio de la región tiende al 94,0 % (áreas urbanas) y 91,0 % (áreas rurales) (AIE, 2017).

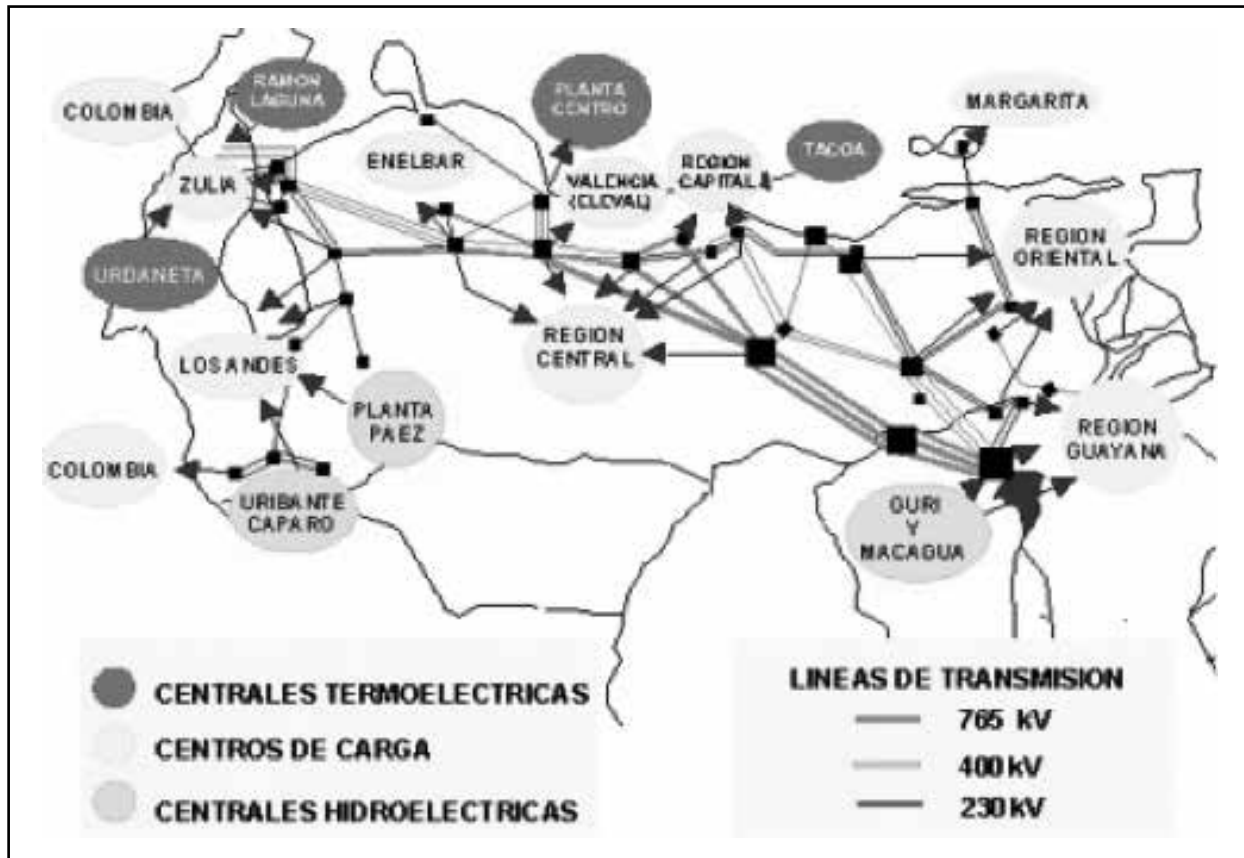


Figura 1. Redes de transmisión y distribución del Sistema Interconectado Nacional. Fuente: (CVG-EDELCA, 2007)

De acuerdo con la matriz energética del Sistema Interconectado Nacional (SIN) y de los datos aportados por el Ministerio de Energía Eléctrica de Venezuela (2013), la producción de energía es mayoritariamente de origen hidráulico (81,85 TWh; 64,05 %). Las demás fuentes incluyen el uso de combustibles fósiles en plantas termoeléctricas (45,95 TWh), donde la tecnología del gas natural ha sido la más utilizada (16,20 %), seguida del gasóleo (13,07 %) y el fuelóleo (6,68 %). Cabe destacar que la distribución porcentual de hidroelectricidad en el 2012 representa el peor valor registrado en los últimos 12 años. En contraste, el uso del gasóleo se ha venido incrementando significativamente hasta alcanzar su nivel máximo en 2012, según se aprecia en la figura 2.

El crecimiento en la producción y consumo de energía eléctrica ha venido evolucionando a una tasa promedio anual de 3,71 % (período 2000-

2012), según se observa en la figura 2. Un valor que, comparativamente con el contexto de la región de América Latina y el Caribe, es relativamente alto. De igual manera, la oferta en el sistema hidroeléctrico ha crecido en 2,22 %, mientras que los sistemas termoeléctricos han mostrado una tasas de crecimiento más elevadas; siendo la tecnología del gasóleo la que mayor incremento ha experimentado (20,11 %), seguido del fuelóleo (5,65 %) y, finalmente, por la tecnología del gas natural (3,66 %). Curiosamente, esta última tecnología es la que menos se ha empleado por los planificadores y/o agentes de decisión para absorber el crecimiento en la producción eléctrica de los nuevos consumos demandados. De hecho, en la teoría se conoce que la tecnología de conversión del gas natural a electricidad es altamente eficiente. Además, es la tecnología que menos efectos ambientales adversos causa a los ecosistemas naturales y artificiales.

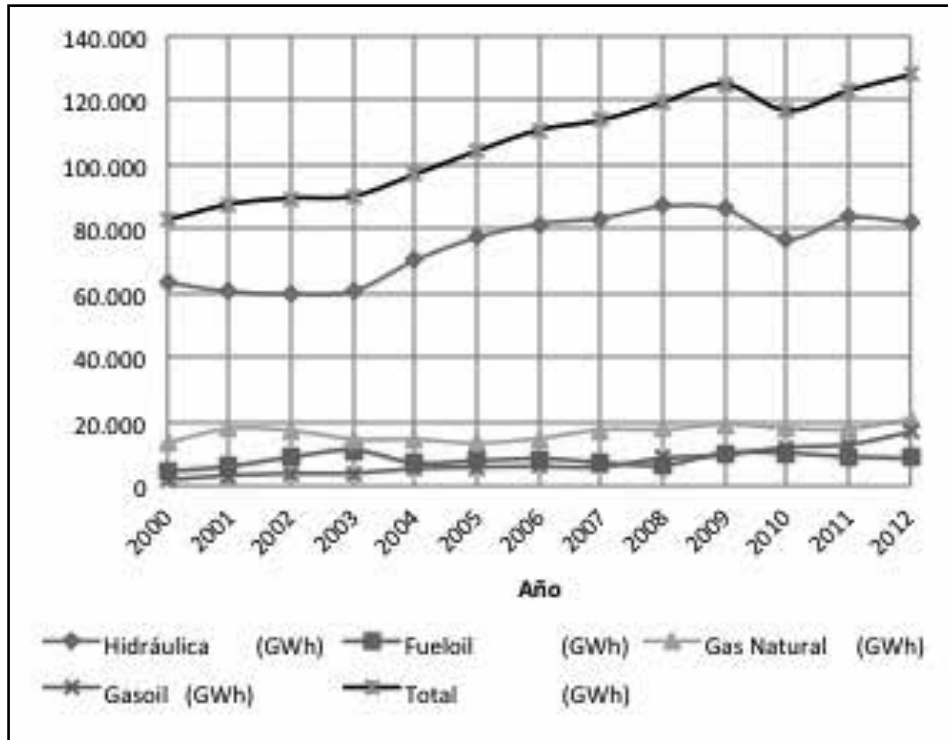


Figura 2. Generación de energía eléctrica en Venezuela (GWh). Fuente: Elaboración propia a partir de (MPPEE, 2013)

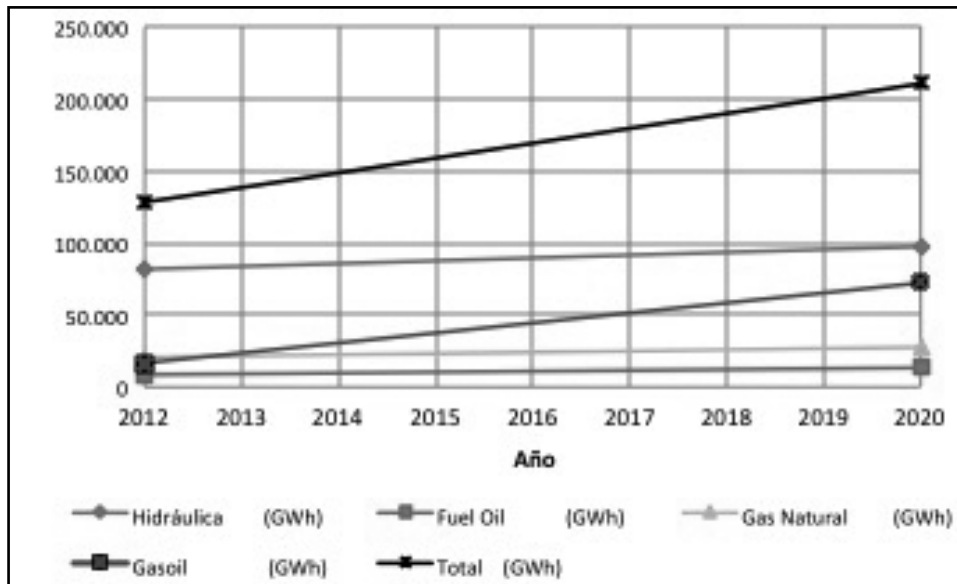


Figura 3. Proyección de la generación anual de energía eléctrica en Venezuela (GWh). Fuente: Elaboración propia a partir de (MPPEE, 2013)

Con relación al futuro de corto y mediano plazo, se prevé que las necesidades eléctricas de la población seguirán creciendo en función de la tasa promedio anual del periodo 2000-2012, tal como se muestra en la figura 3. De esa proyección, se estima que la nueva demanda de energía eléctrica se eleve hasta alcanzar un valor superior a los 200.000 GWh para el año 2020. De ser así, se espera que dicha demanda intensifique el uso de los recursos fósiles que actualmente se están utilizando. En las siguientes secciones se describen los impactos ambientales actuales y futuros (2012, 2020).

Caracterización de los impactos ambientales del Sistema Eléctrico Venezolano

El desarrollo sostenible requiere la aplicación de estrategias, métodos, procedimientos y herramientas que permitan cuantificar y comparar el impacto socio-ambiental de las actividades humanas para la producción de bienes y servicios. De hecho, la electricidad es un elemento fundamental para el desarrollo de cualquier región o país, en donde su generación, transmisión y distribución deben garantizar la accesibilidad de todos sus usuarios, que efectivamente también deberían acceder a un recurso energético limpio y de alta confiabilidad (Correa-Henao y Rojas-Zerpa, 2017).

Precisamente, la medición de impactos ambientales para el acceso a la energía se suele realizar bajo distintos enfoques. Uno de ellos es la metodología Análisis de Ciclo de Vida (ACV), que es recomendada en Rojas-Zerpa (2012) por la valoración de los impactos ambientales en un contexto más objetivo y amplio, donde se toman en cuenta las cargas ambientales en toda la cadena de producción, incluyendo la extracción de materiales, insumos y el desmantelamiento de la tecnología.

En la siguiente subsección se presenta una revisión de los impactos ambientales ocasionados por las diferentes tecnologías utilizadas para la generación de energía eléctrica, así como también los resultados de los impactos ambientales del sistema eléctrico venezolano.

Metodología ACV para la evaluación de los impactos ambientales.

A nivel mundial, ya hay iniciativas que están intentando armonizar la producción de bienes y servicios con el ambiente. De hecho, en la actualidad existe una serie de documentos de la Unión Europea (UE) que, por una parte, fomentan los mercados basados en productos y servicios verdes, entre ellos varios dedicados al fomento de las energías renovables y electricidad sostenible; y, por otra parte, exigen una información correcta para el consumidor y unos criterios objetivos y verificables sobre los beneficios ambientales de las diferentes alternativas (Fullana et al., 2004).

La Política Integrada de Producto de la UE (Fullana et al., 2003) recomienda el cambio paradigmático de una política orientada a la promoción de procesos o tecnologías sostenibles hacia la promoción de productos verdes, es decir, que desde el punto de vista energético habrá productos o servicios sobre los cuales será ambientalmente más correcta la utilización de un tipo de energía y, para otros, tal vez sea más oportuna la utilización de tecnologías convencionales.

Los pasos que está dando la UE para favorecer las acciones que permitan el acceso de los usuarios a los recursos energéticos limpios, es una clara demostración de la implementación de medidas que buscan prevenir, corregir o mitigar la contaminación ambiental y los problemas asociados al calentamiento global. Por ello, es importante considerar la evaluación de las cargas ambientales de la energía para revertir esos procesos y con ello garantizar el acceso a una energía sostenible y de calidad.

En este contexto, el Análisis de Ciclo de Vida es precisamente la herramienta más adecuada para realizar una evaluación lo más objetivamente posible, evitando la transferencia de carga ambiental, ya que se estudia en un plano definido por dos ejes: la multitud de procesos a lo largo de la cadena de producción y su uso; y la multitud de criterios sobre el medio (Fullana y Puig, 1997).

El ACV es una técnica para la evaluación de diversos aspectos relacionados con el desarrollo de bienes

y su potencial impacto a través de la vida del producto desde la adquisición de la materia prima, procesamiento, manufactura, uso y disposición final (ISO 14001, 1997). El impacto ambiental incluye las emisiones al ambiente y el consumo de recursos, así como otras intervenciones asociadas al uso de la tierra, los residuos sólidos, el consumo de agua, entre otros (Varun et al., 2009).

Para este trabajo, y para la evaluación de los impactos ambientales se han considerado los aportes presentados en (Rojas-Zerpa y Yusta-Loyo, 2010), en atención a la cuantificación de los potenciales impactos asociados al calentamiento

global (emisiones GEI), la lluvia ácida (emisiones de SO₂) y la eutrofización (Emisiones de NO_x).

Los autores realizaron una revisión bibliográfica de distintas fuentes internacionales (Agencia Internacional de la Energía, Consejo Mundial de la Energía, Universidad de Surrey, etc.) donde se obtuvieron los valores de emisiones GEI, emisiones de SO₂ y emisiones de NO_x en un contexto de ciclo de vida. Los valores resultantes de cada una de esas categorías de emisiones corresponden al valor promedio de los distintos datos utilizados (ver figuras 4, 5 y 6).

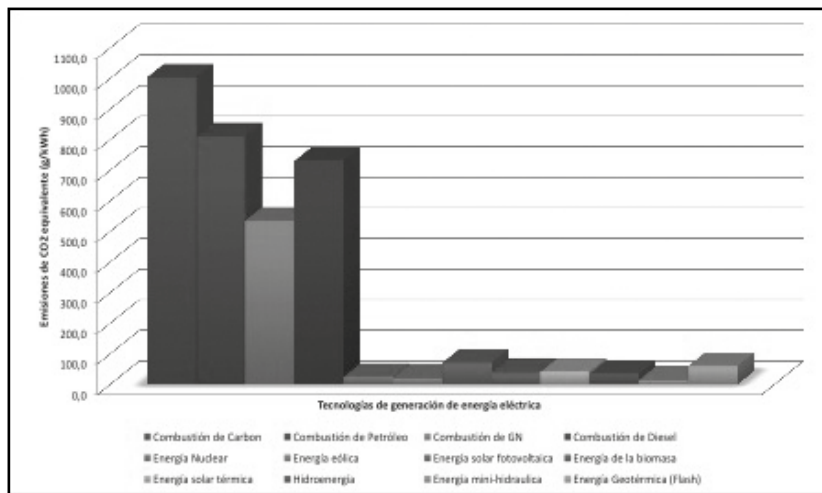


Figura 4. Caracterización de las emisiones de CO₂ de la generación de electricidad.
 Fuente: (Rojas & Yusta, 2010)

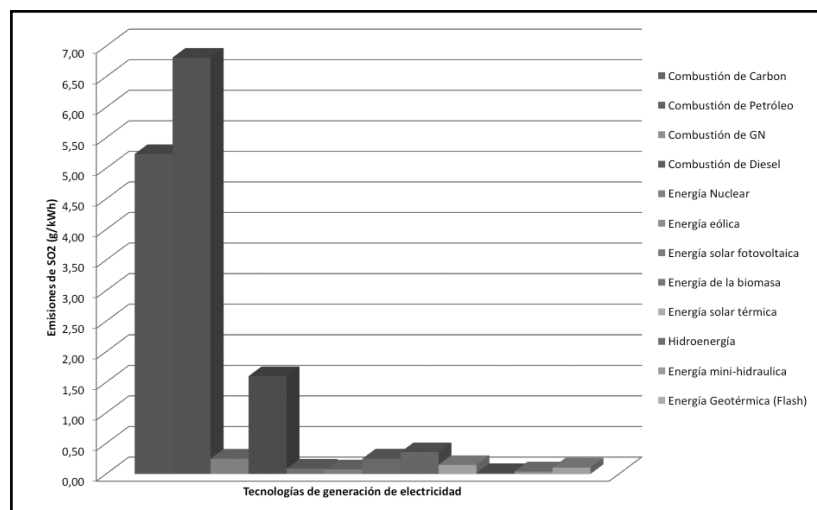


Figura 5. Caracterización de las emisiones de SO₂ de la generación de electricidad.
 Fuente: (Rojas-Zerpa & Yusta-Loyo, 2010)

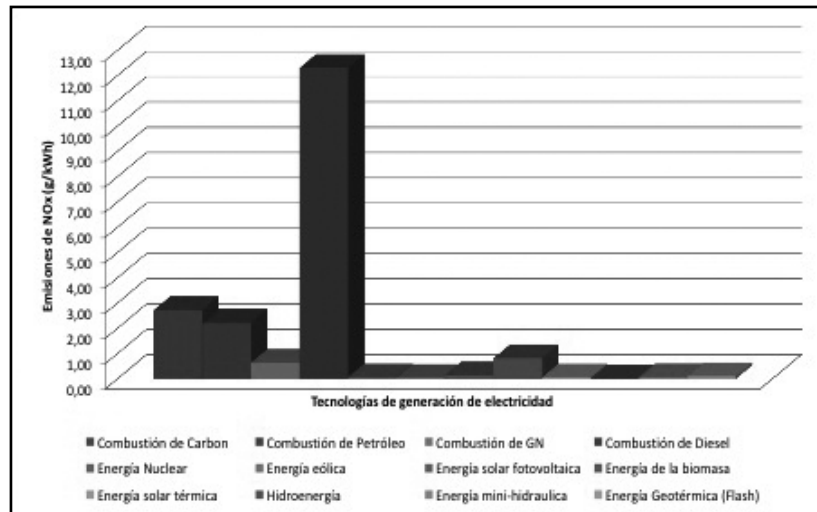


Figura 6. Caracterización de las emisiones de NO_x de la generación de electricidad.
Fuente: (Rojas-Zerpa & Yusta-Loyo, 2010)

Resultados de la evaluación de los impactos ambientales del sistema de generación de energía eléctrica de Venezuela.

Conocidos los niveles de generación de energía eléctrica (kWh/año) para un periodo determinado y para las distintas tecnologías, los valores se multiplicaron por los indicadores de emisiones (gCO₂/kWh) aportados por Rojas y Yusta (2010).

En la tabla 1, se muestran los resultados de los impactos ambientales asociados a la generación de electricidad en el Sistema Interconectado Nacional. De este análisis, se observa que el mayor impacto está relacionado con las emisiones GEI. Comparativamente con las otras emisiones caracterizadas en los distintos años (en masa), los GEI representan más del 99 % de todas las emisiones esparcidas a la atmósfera.

Resultados del año 2012.

Para el caso venezolano (año 2012), los niveles de emisiones GEI superaron los 33 millones de toneladas, siendo el valor más alto registrado en los últimos 12 años. De esas emisiones, las plantas termoeléctricas aportaron el 91,25 %, los cuales se distribuyeron de la siguiente manera: gasóleo (36,85 %), gas natural (33,48 %) y fuelóleo (20,92 %). Las emisiones restantes fueron aportadas por la hidroenergía de gran escala. La tasa de crecimiento anual de emisiones GEI, para el periodo 2000-2012, fue de 7,23 %, cuyo valor duplicó la tasa de

crecimiento anual de la producción de electricidad para el mismo periodo. El índice de generación de cambio climático (IGCC) se incrementó 20,39 %, respecto al valor promedio del periodo 2000-2011. De la comparación entre los datos de Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC) para el 2012, las emisiones totales de Venezuela alcanzaron un valor de 207,41 millones de toneladas de CO₂, lo que representa un 15,98 % asociado a la generación de electricidad (considerando que todas las emisiones de ciclo de vida son mayoritariamente en operación).

En relación con las emisiones de lluvia ácida, se cuantificó un nivel de SO₂ relativamente alto respecto al promedio del mismo periodo (28,17 %). De igual manera, el índice de generación contaminante (IGC) se incrementó ligeramente 6,72 %. A diferencia de las emisiones GEI, el fuelóleo y el gasóleo aportaron el 92,92 % del dióxido de azufre.

Para las emisiones eutroficantes (NO_x), el impacto ambiental es relativamente más intenso en comparación con las emisiones anteriores. En efecto, se cuantificó un incremento de 118,35 % respecto a las emisiones del mismo periodo (2000-2011). En este mismo orden, el IGC del NO_x se incrementó 84,46 %. Similarmente a las emisiones de lluvia ácida, la tecnología del gasóleo y fuelóleo aportó el 94,24 %, siendo el gasóleo el combustible con mayor impacto ambiental (86,3 %).

Tabla 1. Impactos ambientales del Sistema Interconectado Nacional (SIN) de Venezuela. Fuente: Elaboración

Tipo Emisión	Unidad	Año		
		2000-2011	2012	2020
Emisiones CO ₂	(Mt)	2266	33.14	81.99
Emisiones SO ₂	(Mt)	0.071	0.091	0.215
Emisiones NO _x	(Mt)	0.109	0.238	0.938
IGCC CO ₂	(g CO ₂ /kWh)	215.38	259.29	388.75
IGC SO ₂	(g SO ₂ /kWh)	0.67	0.715	1.02
IGC NO _x	(g NO _x /kWh)	1.01	1.863	4.45

Mt: Millones de toneladas; IGCC: índice de generación de cambio climático; IGC: índice de generación contaminante

Resultados del año 2020.

Las estimaciones para el 2020, respecto al año 2012, son aún más desalentadoras. De mantenerse la tendencia por parte de los administradores y decisores del Sistema Eléctrico Nacional de Venezuela (SIN), en satisfacer los consumos de energía de la población con un mayor aporte de combustibles fósiles, los niveles de impactos ambientales, desde el punto de vista de ciclo de vida, se intensificarán.

Como se observa en la tabla 1, tanto las emisiones de CO₂ equivalente y de lluvia ácida se duplicarán, y las emisiones eutroficantes se incrementarán 294.12 %. De igual manera, se estima que el índice de generación de cambio climático (IGCC) alcance los 389 gCO₂ por kWh, incrementándose 49.93 %. Los índices de generación contaminante (IGC) también alcanzarán valores elevados, cuyos incrementos estimados para el dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno serán de 42.66 % y 138.86 %, respectivamente.

Alternativas para la sostenibilidad del sistema de generación de energía eléctrica de Venezuela para el año 2020

De acuerdo con los resultados anteriores, la situación de Venezuela con referencia a su gran sistema centralizado de generación de energía eléctrica para el 2020, podría generar mayores problemas al ambiente y a la salud de sus habitantes. De no revertirse el patrón relativo al uso intensivo de fuentes fósiles en la matriz

energética, las emisiones de gases contaminantes y de calentamiento global serán muy elevadas. No obstante, Venezuela posee un gran abanico de opciones, tales como energía solar, energía eólica, energía minihidráulica, energía de la biomasa, etc., que perfectamente podrían implementarse para evitar, controlar o mitigar los efectos adversos a la calidad ambiental. Entre esas opciones existen excelentes recursos energéticos renovables, ampliamente distribuidos en el país, que podrían sustituir parcial o totalmente a los combustibles fósiles (Rojas-Zerpa & Yusta-Loyo, 2015).

En este contexto, es muy importante considerar diferentes soluciones que efectivamente aporten un mejoramiento del aprovechamiento de los recursos energéticos primarios y, a su vez, una reducción significativa de las emisiones causantes del efecto invernadero, la acidificación y eutrofización; además de otros problemas socio-ambientales que no son considerados en esta investigación.

Para direccionar la sostenibilidad del sistema de generación de energía eléctrica del país se plantean tres propuestas: a) incremento en la oferta de producción con el aporte de fuentes primarias renovables, b) incremento de la eficiencia energética del sistema de producción de energía eléctrica y, c) reducción del consumo final de energía (ahorro energético del lado de la demanda). De las tres opciones anteriores y para los fines del presente trabajo, a continuación se

desarrolla la alternativa a. (Otras alternativas serán estudiadas en futuras publicaciones).

Este incremento de más oferta de renovables en el nuevo mix energético nacional está relacionado con la producción de energía procedente de las fuentes y tecnologías renovables, lo que directamente implica la sustitución parcial y/o total de las tecnologías convencionales basadas en la combustión de recursos fósiles por otras más benignas (acción sobre la fuente de energía primaria). Desde luego, esta acción implica un mejor aprovechamiento de las fuentes de energía primaria con significativas consecuencias sobre la reducción de emisiones GEI, emisiones acidificantes y emisiones eutroficantes. La complejidad de esta propuesta radica en la combinación de las tecnologías que mejor aprovechamiento energético induzcan y menores emisiones GEI y contaminantes generen; lo cual no es el objeto de la presente investigación.

Una importante característica que tiene Venezuela es su elevada riqueza energética. En efecto, el país ocupa una posición privilegiada a nivel mundial con referencia a la producción y reservas de recursos fósiles (Rojas-Zerpa y Yusta-Loyo, 2015). Adicionalmente, también presenta una abundante potencialidad de recursos energéticos renovables superior a los 3270 millones de barriles equivalente de petróleo (Rojas-Zerpa y Yusta-Loyo, 2015). A modo de comparación, en el año 2012, esta potencialidad fue equivalente al 245 % con referencia a la energía primaria producida de fuentes fósiles (petróleo, gas natural y carbón) y, a su vez, 1065 % respecto al consumo final de

energía en el mercado interno. Este último dato revela la enorme potencialidad de las fuentes renovables del país, para satisfacer las necesidades de energía primaria de sus consumidores, aplicadas a la generación de electricidad a pequeña y gran escala.

Para contrastar esta potencialidad, en las siguientes tablas se resumen los resultados de la sustitución total o parcial de las tecnologías convencionales por las fuentes de origen renovables y su impacto en la matriz energética del sistema de generación eléctrica de Venezuela.

En la tabla 2, se observa que para el año 2020 la nueva matriz energética propuesta conlleva una reducción drástica de las fuentes fósiles para su conversión en electricidad. Al respecto, se busca que el consumo de fuelóleo y gasóleo tienda a cero y el gas natural se reduzca en un 50%. Para reducir total y parcialmente estos combustibles, se requiere la inclusión de fuentes y tecnologías limpias (energías renovables), que efectivamente sean capaces de suministrar el aporte de los combustibles fósiles en forma segura y confiable. De hecho, en esta propuesta se sustituye el 100 % del fuelóleo por minihidráulica, el 100 % del gasóleo por energía eólica y el 50 % del gas natural por energía solar fotovoltaica. Así mismo, se espera una reducción en el uso de la energía hidráulica, ubicándose en una aportación a la matriz energética de 46 % de la energía requerida.

En resumen, la energía eólica reemplaza totalmente al gasóleo; la energía minihidráulica sustituye el 50 % del gas natural y la energía solar el 100 % del fuelóleo.

Tabla 2. Participación porcentual de las tecnologías convencionales y renovables en el sistema de generación de energía eléctrica, año 2012 (valores oficiales del MPPEE del 2013) y 2020 (valores propuestos).

Tecnología	Año	
	2012	2020
Hidráulica	64,05 %	46,27%
Fuelóleo	6,68 %	0
Gas Natural	16,20 %	6,54%
Gasóleo	13,07 %	0
Energía Eólica	0	34,21%
Energía Minihidráulica	0	6,34%
Energía solar fotovoltaica	0	6,54%
Total	100%	100%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Participación porcentual de las fuentes y tecnologías renovables en la nueva matriz de generación de energía eléctrica respecto al potencial aprovechable de cada fuente, año 2020.

Fuente y Tecnología	Año 2020
Hidráulica	8,91 %
Energía Eólica	8,71 %
Energía Minihidráulica	17,45 %
Energía solar fotovoltaica	0,51 %
Total Energías Renovables	3,73 %

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3 se resume la aportación de cada una de las fuentes renovables en función de la potencialidad aprovechable del país. La sustitución total del fuelóleo y gasóleo implicaría la utilización del 17,45 % del recurso hidráulico de pequeña escala y 8,71 % de la energía eólica, respectivamente. De igual manera, para el gas natural, una reducción en el consumo de este recurso por otro, apenas implicaría menos del 1 % de la energía solar disponible para Venezuela. En términos generales, estos nuevos aportes energéticos representarían una décima parte del potencial total de las energías renovables, lo que numéricamente deja en evidencia la amplia disponibilidad de estos recursos para su aplicación

en la generación de electricidad, ya sea en forma centralizada o distribuida preferiblemente.

Como ya destacó anteriormente, la potencialidad aprovechable de las energías renovables es cuantitativamente suficiente para promover políticas institucionales que impliquen la sustitución del 100 % de las tecnologías convencionales (basadas en la combustión de recursos fósiles) por fuentes y tecnologías limpias (energías renovables). De igual manera, dicha potencialidad representa una excelente oportunidad para el total abastecimiento del consumo de energía eléctrica del país, lo cual es importante para garantizar la seguridad energética nacional.

El impacto ambiental de tal sustitución, desde el punto de vista ACV, implicaría un ahorro importante de emisiones GEI, emisiones acidificantes y emisiones eutroficantes. Como se observa en la tabla 4, la sustitución de combustibles fósiles por renovables permitirían alcanzar unos niveles en el orden de 13,57 Mt CO₂eq por año; 0,01 Mt SO₂ por año y 0,01 Mt NO_x por año. En términos porcentuales, este efecto implicaría el ahorro de emisiones en el orden de 83,45 % de CO₂, 93,25 % de SO₂ y 98,42 % de NO_x (figura 7). Esta ganancia socio-ambiental es coherente con el índice de generación de cambio climático (IGCC) y los índices de generación contaminante (IGC SO₂, IGC NO_x) de la nueva matriz energética propuesta, los cuales son significativamente inferiores a los valores determinados para el caso referencial relacionado con el año 2020 sin acción de mejoramiento. Por ejemplo, un IGCC de 64,34 gCO₂/kWh de la nueva matriz energética evidencia un sistema de conversión bastante limpio, es decir, con mínima huella de carbono, lo que repercute directamente en un mínimo impacto al clima.

Dados estos notables beneficios, Venezuela perfectamente podría mejorar su eficiencia en el uso de sus recursos fósiles y renovables, haciendo que su actividad en el campo de la conversión de la energía eléctrica y su aprovechamiento sea un modelo de sostenibilidad.

Tabla 4. Resumen de emisiones GEI, emisiones contaminantes e índices de generación contaminante inherentes a la producción de energía eléctrica, relativas al año 2020.

Variables	Cantidad	Unidad
Emisiones de CO ₂	13,57	MtCO ₂ /año
Emisiones de SO ₂	0,01	MtSO ₂ /año
Emisiones de NO _x	0,01	MtNO _x /año
IGCC-CO ₂	64,34	gCO ₂ /kWh
IGC-SO ₂	0,07	gSO ₂ /kWh
IGC-NO _x	0,07	gNO _x /kWh

Fuente: Elaboración propia

Desde el punto de vista de generación de empleo, teniendo en cuenta los niveles de generación de electricidad por cada una de las nuevas tecnologías en proporción a los indicadores de creación de puestos de trabajo aportados por Rojas-Zerpa (2012), la sustitución de tecnologías renovables (solar fotovoltaica, eólica de pequeña y gran escala, y minihidráulica) implicaría la generación de nuevos puestos de trabajo. Al respecto, se estima una creación de más de 27 900 nuevos puestos de trabajos (directos e indirectos). Donde muchos de estos puestos se consideran empleos de calidad o mano de obra altamente calificada.

El personal que queda disponible de las fuentes que son sustituidas: gasóleo, fuelóleo y gas natural, una pequeña parte de los mismos, podría quedar en reserva para dichas instalaciones y con ello tener recursos humanos disponibles para estabilizar la demanda del Sistema Interconectado Nacional en situaciones especiales, como por ejemplo: la elevada demanda de energía en un día caluroso, la intermitencia en algunas de las fuentes renovables, la ocurrencia de lluvias extremas o anómalas, etc. Así mismo, otra parte de ese personal podría ser ubicado en actividades de desarrollo de nuevas tecnologías o en un Plan Nacional de Eficiencia y Ahorro Energético.

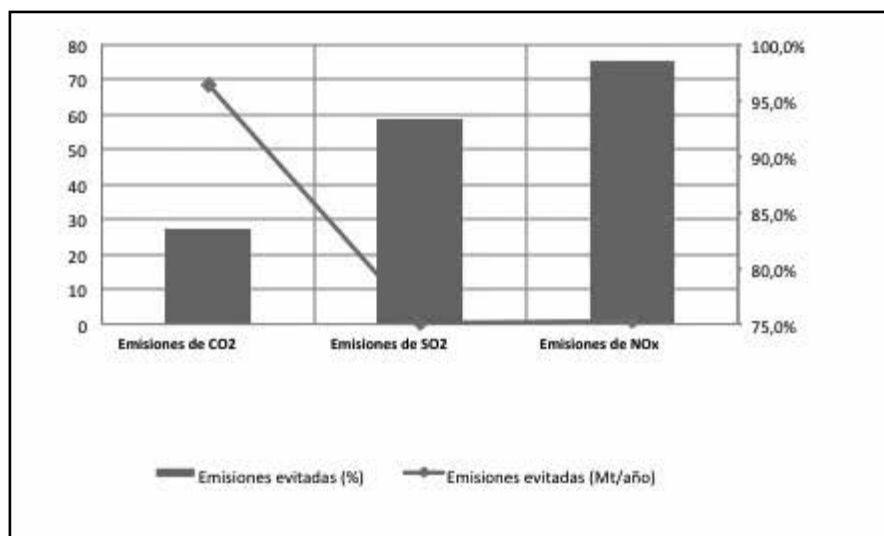


Fig. 7. Emisiones evitadas en la nueva matriz del sistema de generación de electricidad de Venezuela (Mt/año), proyección al año 2020. Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

Si bien es cierto que una gran parte de la energía eléctrica producida en Venezuela es de origen renovable (más del 64%), sus plantas termoeléctricas contribuyen de manera significativa a la emisión de gases efecto invernadero y sustancias contaminantes a la atmósfera (emisiones ácidas y emisiones eutroficantes). Efecto que en el caso del CO₂, sus emisiones actuales (desde el punto de vista de ACV) implican el 16 % del total de Venezuela.

En los últimos años se ha venido expandiendo el uso de combustibles fósiles para satisfacer la demanda nacional de electricidad, entre ellos el gasóleo se ha incrementado de una manera exagerada. El empleo del fuelóleo también ha aumentado significativamente y el gas natural, en menor escala. Las consecuencias de ésta matriz energética son claramente apreciables en los índices de generación de cambio climático (IGCC) y de generación contaminante (IGCSO₂, IGCNO_x), que actualmente son mayores a los anteriores. En efecto, en la medida que menos fuentes renovables participen en la nueva matriz energética, más elevados serán los índices y más intensos los efectos socioambientales adversos.

Para el año 2020 se espera, de no revertirse la situación actual, una intensificación de los impactos

ambientales que se reflejarían claramente en unos índices de generación contaminante y de cambio climático más elevados, lo que potencialmente incidiría en un mayor riesgo de afectación a la calidad ambiental de sus ecosistemas naturales y artificiales y, probablemente, con importantes consecuencias para la salud de la población y la biodiversidad.

En términos cuantitativos, se evidencia que las tecnologías renovables son técnicamente factibles (al menos en cantidad de energía) para suministrar aportes significativos de energía en el nuevo mix energético venezolano (mix energético sostenible), caracterizado por la aportación de energía ambientalmente benigna, segura y localmente disponible (energía descentralizada); teniendo en cuenta que efectivamente estos sistemas son una solución energética.

La conformación de un sistema de generación de energía eléctrica sostenible implica un aprovechamiento adecuado de las fuentes de energía primaria, dando prioridad a las tecnologías que impliquen el menor impacto ambiental y los mayores beneficios sociales y económicos.

Desde el punto de vista de sostenibilidad ambiental, los indicadores de generación de cambio climático y los de contaminación que

se obtienen del mix energético empleado en la generación de electricidad del país, pueden proporcionar información valiosa y determinante del estado de afectación al calentamiento global y contaminación. Unos niveles de CO₂, SO₂ y NO_x elevados implican la participación dominante de tecnologías basadas en la combustión de recursos fósiles. En contraste, unos niveles bajos de estas sustancias implican la participación significativa (dominante) de tecnologías limpias, además de una mayor eficiencia energética.

En el caso de Venezuela se ha hecho lo contrario, el crecimiento de la oferta de energía eléctrica se ha realizado significativamente con nuevos aportes de tecnologías convencionales como el gasóleo y fuelóleo; mientras que la tecnología del gas natural y la hidroenergía han mostrado un crecimiento poco significativo. De allí, que el IGCC del CO₂, así como los IGC del SO₂ y NO_x no han sido los más favorables (índices actuales). Sin embargo, hay que destacar el esfuerzo que ha hecho el país por mantener los niveles de energía hidráulica como un factor importante dentro del actual mix energético. La nueva propuesta de generación eléctrica sostenible al 2020, representa un incremento de las fuentes de origen renovable del 1,84 % al 3,73 % (hidroenergía de gran escala y energías renovables no convencionales), consiguiéndose con ello la sustitución del 100 % de las tecnologías fósiles actuales tales como fuelóleo y gasóleo, y un 50 % del gas natural. Entre los beneficios de tal sustitución se evidencia un ahorro importante de combustibles fósiles, que podrían ser comercializados en el mercado internacional o favorecer su procesamiento interno para obtener mayor valor en productos elaborados. Así mismo, se puede obtener un ahorro altamente significativo de emisiones contaminantes a la atmósfera y de emisiones causantes del sobrecalentamiento global. La instalación de tecnologías renovables no convencionales como la eólica, solar fotovoltaica y la energía minihidráulica generarían más de 27 000 nuevos puestos de trabajo, lo que evidentemente puede generar un impacto favorable en la economía local y el bienestar social.

La implementación de fuentes y tecnologías renovables en la nueva matriz energética de Venezuela permitiría el despliegue de un nuevo paradigma del suministro eléctrico conocido como

“Generación Distribuida”. De esta manera se podrían aprovechar múltiples fuentes de recursos energéticos renovables, que están distribuidos en todo el territorio nacional. De hecho, la amplia variedad de ecosistemas naturales del país, incluidos los accidentes geográficos, favorecen el aprovechamiento de los recursos energéticos in situ, con mejor desempeño en términos de eficiencia, costos, aceptación social de la energía, impactos ambientales y desarrollo social.

Dado que las energías renovables son intermitentes, es conveniente hacer los ajustes pertinentes que promuevan la sustitución progresiva y sistemática de las actuales tecnologías termoeléctricas, comenzando por las tecnologías más desfavorables ambientalmente como el fuelóleo y gasóleo.

Finalmente, la implementación de medidas sugeridas en este trabajo, para orientar la sostenibilidad del sistema de generación eléctrica del país, podría hacer que el mismo se convierta en una referencia mundial en cuanto al aprovechamiento racional, eficiente y estratégico de los recursos energéticos primarios. Aspecto clave que puede lograrse a través de la adopción de políticas energéticas y ambientales de alto nivel, con planes y programas que claramente estén direccionados hacia el Desarrollo Sostenible de la Nación.

Referencias

- Agencia Internacional de la Energía (AIE). (2016). World Energy Outlook 2016. Resumen ejecutivo en español. 9 rue de la Fédération, 75739 Paris Cedex 15, France.
- Agencia Internacional de la Energía. (2017). World Energy Outlook 2017. Resumen ejecutivo en español. 9 rue de la Fédération, 75739 Paris Cedex 15, France. Disponible: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO_2017_ExecutiveSummary_Spanish_version.pdf [Consulta: Febrero 2018]
- Agencia Internacional de la Energía. (2017). Energy Access Outlook 2017. Disponible: <https://www.iea.org/energyaccess/database/> [Consulta: Febrero 2018]
- Baldasano, J. (2007). Cambio climático, evidencias e impactos. Seminario Internacional de Energías Renovables. Universidad Politécnica de Cataluña -, Cuenca – Ecuador.
- British Petroleum (B.P). (2017). Energy Outlook

2017. Disponible: <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2017/bp-energy-outlook-2017.pdf> (Consulta: Febrero 2018)
- Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC). (2013). Fossil fuel CO₂ emissions: Preliminary 2011 and 2012 Global and National estimates. Disponible: http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/meth_reg.html [Consulta: Octubre 2016].
- Correa-Henao, Gabriel Jaime, & Rojas-Zerpa, Juan Carlos. (2017). Marco de referencia para la planificación de generación distribuida en zonas no interconectadas. *Iteckne*, 14(1), 70-87. Disponible: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-17982017000100009&lng=en&tlng=es
- CVG – EDELCA. (2007). Sistema interconectado nacional, Corporación Venezolana de Guayana y Electrificación del Caroní, 2007.
- De-Juana, J. M., A., F., J., F., F., S., MA, H., & A., C. (2003). Energías renovables para el desarrollo, (31), 311. Retrieved from <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=NyvcConRxoC&pgis=1>
- European Strategy and Policy Analysis System (ESPAS). (2016). Tendencias mundiales hasta 2030: ¿puede la Unión Europea hacer frente a los retos que tiene por delante? Luxemburgo: autor.
- Fuel_cell (2009). Fuel Cell Benefits. Disponible en: <http://www.fuelcelltoday.com/> (Consulta: Junio 5, 2017)
- Fullana, P., Betz, M., Faltenbacher, M. (2004). Evaluación comparada de fuentes de energía mediante ACV. *Ingeniería Química*, Junio 2004.
- Fullana, P., Mantoux, F., Mila, L. (2003). La política integrada de producto y las ecoetiquetas. *Ingeniería Química*; 403:74-78.
- Fullana, P. y Puig, R. (1997). Análisis del ciclo de vida. Barcelona: Ediciones Rube, ,
- IPCC. (2014). Climate Change 2014. Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- ISO 14001. (1997). Environment management – Life cycle assessment – Principles and Framework, 1997.
- Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica (MPPEE). (2013). Anuario estadístico 2013: Cifras correspondientes al Sector Eléctrico Venezolano 2012. Disponible: http://www.mppee.gob.ve/download/anuario_estad%3%ADstico/Anuario_2013.pdf [Consulta: 2016, Octubre 9].
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, siglas en inglés). (2007). Cambio climático 2007: informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al IV Informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. IPCC, Ginebra, Suiza; 104 páginas.
- Rojas-Zerpa, J. (2012). Planificación del suministro eléctrico en áreas rurales de los países en vías de desarrollo: un marco de referencia para la toma de decisiones” (Tesis Doctoral), Universidad de Zaragoza, Zaragoza-España, Disponible: <http://personal.unizar.es/jmyusta/wpcontent/uploads/2014/09/Tesis-Juan-Rojas.pdf>
- Rojas-Zerpa, J. & Yusta-Loyo J. (2010). Impactos ambientales de los sistemas de generación de energía eléctrica. X Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno “Energías Renovables” y IV Congreso Internacional de Uso Racional y Eficiente de la Energía-CIURE 2010, Código de identificación: XSMH108; México.
- Rojas-Zerpa, J. & Yusta-Loyo, J. (2015). Producción, reservas y sostenibilidad de la energía en Venezuela. *Lampsakos* N° 14, pp. 52-60, Julio-Diciembre 2015. Medellín-Colombia.
- UNESCO. (2014). Datos y estadísticas de Agua y Energía. Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo 2014.
- Varun, Bhat, I. y Prakash, R. (2009). LCA of renewable energy for electricity generation systems - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volume 13, pp. 1067-1073.
- World Energy Council (WEC). (2014). University of Cambridge and European Climate Foundation. Cambio climático: Implicaciones para el sector energético, Junio de 2014.