

Método de sumas ponderadas para selección de sistemas energéticos no convencionales

Weighted sums evaluation applied for selection of nonconventional energy sources

María Fernanda Serrano Guzmán¹, Diego Darío Pérez Ruíz², John Freddy Galvis Martínez³,
Marlon Leonardo Rodríguez Sierra⁴

^{1,2}Ing. Civil, Ph.D., Profesor Investigador, Pontificia Universidad Javeriana Cali, Grupo Decor. Cali-Colombia,
³Ing. Civil, Mg. Ingeniería Civil, Universidad Pontificia Bolivariana, Investigador Grupo Decor. Bucaramanga-
Colombia, ⁴Ing. Civil, Mg. Ingeniería Civil, Universidad Pontificia Bolivariana, Investigador Grupo Decor.
Bucaramanga-Colombia

Email: maria.serrano@javerianacali.edu.co

Recibido 04/11/2016

Aceptado 1/05/2017

Cite this article as: M. F. Serrano, D. D. Pérez, J. F. Galvis, M. L. Rodríguez, "Weighted sums evaluation applied for selection of nonconventional energy sources", *Prospectiva*, Vol 15, N° 2, 7-12 2017.

RESUMEN

Una buena parte de las actividades humanas emplea energía la cual proviene de origen hídrico o de combustibles fósiles. Sin embargo, la disminución en la cantidad de agua disponible, los cambios en la calidad del aire y otros deterioros ocasionados en el paisaje están incentivando el uso de fuentes energéticas no convencionales las cuales afectan en menor proporción la calidad del ambiente. En este artículo se emplea el método de las sumas ponderadas para la evaluación de la calidad ambiental de las fuentes energéticas a base de carbón, gas, eólica, solar, nuclear y biomasa. Aunque este método de selección jerarquiza las fuentes energéticas en función de los atributos huella hídrica, huella de carbono, huella de la tierra y costo de producción, para la puesta en marcha de proyectos energéticos deben tenerse en cuenta otros criterios y llevar a cabo la evaluación por métodos más complejos. Los resultados del trabajo realizado arrojan que la energía eólica, la termosolar y la de biomasa a base de la caña de azúcar son las más recomendadas porque tienen indicadores de calidad ambiental altos.

Palabras claves: Fuente de energía alternativa; Calidad ambiental; Evaluación; Sumas ponderadas.

ABSTRACT

Much of human activity uses energy which comes from water or fossil fuels. However, the decrease in the amount of water available, changes in air quality and other damage caused to the landscape are encouraging the use of non-conventional energy sources which cause a lesser effect in the quality of the environment. This article describes the method of weighted sums for assessing the environmental quality of energy sources based on coal, gas, wind, solar, nuclear and biomass. Although the proposed method of selection hierarchizes energy sources considering water footprint attributes, carbon footprint, footprint of land and production costs, for a final implementation of energy projects must be included other criteria and use other complex methods. The results of the work suggest that wind energy, thermal and biomass-based sugar cane energy are the most recommended because they have high environmental quality indicators.

Key words: Renewable energy sources; Environmental quality; Evaluation; Weighted sums.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las comunidades y la diversidad de ocupaciones para obtener el sustento son algunas de las razones por las cuales a nivel mundial se está produciendo un desgaste del recurso hídrico, del suelo y del aire, alteraciones que generan repercusiones económicas, afectan la calidad ambiental y para cuya cuantificación usualmente se usan indicadores. La huella hídrica, que es un indicador empleado para evaluar la sostenibilidad que tiene determinada actividad, se emplea para medir de manera multi-dimensional, temporal y geográficamente, los volúmenes consumidos y los volúmenes contaminados de agua en cada actividad o proceso [1]. De esta forma, se evalúa el consumo del agua, que en la actualidad ha ido en aumento por cuanto este recurso se emplea para satisfacer las necesidades de la población en diferentes actividades [2]. Así mismo, existen otros indicadores como son la huella de carbono y la huella de la tierra con los que se cuantifican las repercusiones en el aire y en el suelo. La huella de carbono por su parte es un indicador con el que se cuantifican las emisiones de gases de efecto invernadero y resulta útil cuando se busca identificar oportunidades de reducción de consumo energético [3]. En cuanto a la huella de la tierra, con este indicador se evalúa la cantidad de terreno necesario para desarrollar cierta actividad [4].

Para llevar a cabo la gran variedad de actividades económicas se requiere, en la mayoría de los casos, un consumo alto de energía con el consecuente riesgo de emisiones atmosféricas y de deterioro ambiental. Justamente, en la búsqueda de alternativas “limpias” o menos contaminantes, surgen fuentes energéticas que pueden emplearse aportando a la oferta energética de los países. Este artículo se centra en la aplicación del método de sumas ponderadas para selección de fuentes energéticas no convencionales. Para ello, se parte de la valoración de la huella hídrica, la huella de carbono, la huella de la tierra y del costo de producción de energía partiendo de fuentes energéticas como solar, eólica, nuclear, biomasa, gas y carbón, con el fin de jerarquizar la fuente energética que afecte en menor proporción el ambiente, es decir que arroje un mayor valor de calidad ambiental.

2. ANTECEDENTES

Las fuentes energéticas no convencionales se seleccionan tomando en consideración justificaciones técnicas como: el consumo del agua, la ocupación del suelo, las emisiones de CO₂, NO_x y otros contaminantes y los costos, entre otros aspectos. En este artículo se presenta la evaluación de alternativas de fuentes energéticas tomando en consideración condiciones particulares de afectación en el agua, en el suelo y en el aire de energía

solar, eólica, nuclear, biomasa, gas o carbón, haciendo la reflexión mediante las huellas correspondientes.

2.1 Con relación al recurso hídrico

Las afectaciones en el recurso hídrico se reflejan durante la producción de energía. En la producción de energía solar fotovoltaica, por ejemplo, se consumen alrededor de 229 Gal/MWh de agua y durante la operación de un parque solar el consumo de este fluido empleado para la limpieza de las celdas solares es de 2 Gal/MWh [5]. Para el caso de la energía eólica, en la producción de las turbinas se requiere 60 Gal/MWh y alrededor de 1Gal/MWh durante el funcionamiento de la central [5].

Con respecto al carbón, para una termoeléctrica agua-vapor se requieren alrededor de 58Gal/MWh para la explotación y procesamiento del carbón, 473 Gal/MWh para el transporte por ducto y para el almacenamiento y procesamiento alrededor de 7 Gal/MWh lo cual daría un total en el proceso de obtención de carbón de 538 Gal/MWh [5]. Además, para la conversión de energía mecánica en energía eléctrica se requieren 749 Gal/MWh. Ahora, para el enfriamiento del sistema cuando se emplea pozo de enfriamiento, el requerimiento del fluido es de 1,157 Gal/MWh de agua [5].

Para la producción de energía partiendo del gas natural se requiere 20.077 G/MWh [6], aunque cuando se realiza fracturamiento hidráulico pueden requerirse entre 9000 y 29000 metros cúbicos de agua por pozo perforado, cantidad que se ve ampliada cuando se analiza todo el campo de perforación [7]. Se debe destacar que durante la fracturación se pueden liberar hidrocarburos o agua salina [8], metano [9], algunas sustancias químicas cancerígenas asociados [10] y compuestos como el benceno [11]. Por otro lado, es importante enfatizar que los riesgos de la técnica de fracturamiento surgen cuando hay ausencia de buenas prácticas industriales [12].

En cuanto a la generación eléctrica partiendo de la biomasa, como es de esperarse, requiere mayor cantidad de agua por la actividad de riego. Bioenergéticos como la remolacha consumen alrededor de 43712Gal/MWh, mientras que maíz y la caña de azúcar consumen 47513 Gal/MWh [13]. Finalmente, durante la producción de energía nuclear se requiere un consumo de agua promedio de 60759 Gal/MWh para disminuir la temperatura en la refrigerante del núcleo y antes de realizar la descarga en la fuente hídrica aledaña [6].

2.2 Con relación al recurso suelo

La afectación en el recurso suelo se aprecia principalmente en la ocupación de los terrenos. Para el caso del

funcionamiento de una central solar el impacto está relacionado con la radiación solar de la región y con la eficiencia de los paneles solares, es decir si la radiación solar y la eficiencia de los paneles son bajas se requieren mayores extensiones de terreno. Como ejemplo, si se emplean celdas de silicio mono-cristalino con una eficiencia de 14%, el área neta debe ser de 285.7 ha mientras que las de silicio de lámina delgada con una eficiencia de 11.5% requieren un área neta de 347.83 ha [14].

En cuanto a la energía eólica, el impacto sobre el suelo tiene un rango de 0.06 a 2.4 hectáreas/MW [14], empleadas aproximadamente de la siguiente forma: 10% en ocupación de turbinas, 79% para carreteras de acceso, 6% para la subestación, 2% para las redes de transmisión y un 3% para los campamentos y bodegas. Por su parte, tomando en consideración la fuente energética a base de carbón se reporta que el factor de uso de suelo de las centrales térmicas es 0.2636ha/MW [6].

Para el caso de la fuente energética a base de gas, la afectación del suelo ocurre principalmente al momento del tendido de las redes de gasoductos cuyos diámetros pueden llegar a ser de 8 pulgadas y lógicamente durante la instalación de los pozos de perforación. Los impactos ambientales negativos ocurren durante la producción, transporte, distribución y almacenamiento ante la posibilidad de escapes que pueden desencadenar explosiones [15] así como por el retorno de líquidos de explotación que regresan a la superficie y deben ser tratados [8].

Con relación a la biomasa, para el 2050 se espera una ocupación de cultivos bioenergéticos del orden de 1.313 Gha [16] y se teme por la tendencia a la práctica de monocultivos que pueden agotar la capacidad del suelo y los ecosistemas con la consecuente afectación a la biota terrestre derivada de la degradación resultante [17].

2.3 Con relación al recurso aire

Con relación a la contaminación atmosférica, justamente las fuentes energéticas no convencionales se implementan buscando la menor generación de CO₂ y NO_x y otros contaminantes. En la producción de biomasa, el carbono liberado es neutro [18] aunque el manejo de monocultivos y la competencia con los cultivos agroalimenticios y forestales incrementa las emisiones atmosféricas debido a la deforestación o a las tecnologías de fabricación de alto consumo energético [19].

Con respecto a la fuente energética a base de gas se han reportado que las emisiones de CO₂ generadas por la quema de gas natural son del orden de 117.000 libras por billón de BTU, lo que representa 30% menos que las emisiones derivadas del petróleo y 45% menos

que las derivadas del carbón [20]. Así mismo, las emisiones de NO_x han representado reducciones de 365 y 356 libras por billón de BTU menos que el carbón y el petróleo y en cuanto a SO₂, las emisiones de gas natural son bastante reducidas, del orden de 1 Lb/BBtu frente a 1122 del petróleo y 2591 Lb/BBtu del carbón [21]. Con respecto al material particulado, igualmente las ventajas del gas natural en relación al petróleo y el carbón son evidentes ya que la reducción en comparación con el petróleo equivale a 77 Lb/BBtu y al carbón 2737 Lb/BBtu de material particulado generado [21].

En el caso de la energía nuclear, la producción, por ejemplo, de 1000 MW requiere de 13.33 ha/kg de uranio que genera cantidades significativas de residuos radioactivos [22] pero no genera emisiones significativas de CO₂.

3. METODOLOGÍA

Para la aplicación del método de las sumas ponderadas en la selección de fuentes energéticas no convencionales se realizó una revisión de casos reportados a nivel científico sobre el comportamiento de la energía solar, eólica, nuclear, biomasa, gas y carbón. Posteriormente, se identificaron los valores correspondientes a la huella hídrica, la huella de carbono, la huella de la tierra y el costo de producción de energía con cada fuente energética. Finalmente, se adaptó el método de las sumas ponderadas disponible en [23] desarrollado por la EPA (Environmental Protection Agency). Este método es útil por cuanto permite jerarquizar los distintos energéticos considerando la importancia relativa de los atributos que se evalúan buscando con ello la selección de una o varias alternativas energéticas, aunque para efectos de selección de la alternativa óptima se deben considerar otros atributos objetivos y subjetivos que no se contemplan en este método. Las etapas que se siguen son [23]:

- A. Identificación de los valores reportados en la literatura con relación a los atributos de la huella hídrica, la huella de carbono, la huella de la tierra y el costo de producción de energía.
- B. Asignación de peso de cada factor considerando la importancia relativa. En este caso, el equipo de trabajo otorgó un factor de importancia de 25 para la huella hídrica, 30 para la huella de carbono, 15 para la huella de la tierra y 30 para el costo.
- C. Evaluación de cada fuente por el equipo de trabajo.
- D. El valor otorgado en la evaluación se multiplica por el peso de cada factor y se hace la sumatoria para obtener el total de cada energético.
- E. Se analiza la fuente energética que obtiene la mayor puntuación. Según la escala de ponderación establecida, una fuente energética de la mejor calidad ambiental tendrá un puntaje de 2000.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Con respecto a la escala de valoración

La escala de valoración se acordó con el equipo de trabajo. Para cada uno de los atributos se asignó un valor mínimo de 2 y un valor máximo de 20 (tabla 1) tomando en consideración los valores promedio de

las huellas reportadas y según las escalas acordadas, valores bajos de huella hídrica, huella de carbono y huella de la tierra, así como de costo/KWh arrojarán el valor más alto de calidad ambiental. Para el modelo implementado, la mayor ponderación final arrojará la mejor calidad ambiental resultante del uso de una fuente energética en una región.

Tabla 1. Escala de evaluación implementada.

Table 1. Assessment evaluation implemented.

Huella de Carbono (gCO ₂ e/kWh)	Escala de Evaluación	Huella Hídrica (m ³ /GJ)	Escala de Evaluación	Huella en la Tierra (m ² /GWh)	Escala de Evaluación	Costo (Dólar/kWh)	Escala de Evaluación
Entre 1 y 20	20	Menos de 0.5	20	Menos de 100	20	Menos de 3	20
Entre 20.01 y 50	15	Entre 0.51 y 10	15	Entre 100.01 y 500	15	Entre 3.01 y 5	15
Entre 50.01 y 90	10	Entre 10.01 y 20	10	Entre 500.01 y 700	10	Entre 5.01 y 7	10
Entre 90.01 y 150	8	Entre 20.01 y 50	8	Entre 700.01 y 1300	8	Entre 7.01 y 10	8
Entre 150.01 y 500	6	Entre 50.01 y 70	6	Entre 1300.01 y 2500	6	Entre 10.01 y 15	6
Entre 500.01 y 800	4	Entre 70.01 y 80	4	Entre 2500.01 y 10.000	4	Entre 15.01 y 17	4
Más de 800	2	Más de 80	2	Más de 10.000.01	2	Más de 17.01	2

4.2 Con respecto a la jerarquización de las fuentes energéticas

Como se mencionó anteriormente, los valores promedio de las huellas hídricas, de carbono, de la tierra y el costo de producción de energía empleando cada fuente energética fueron obtenidos de la literatura según estudios de campo realizados en diferentes regiones. Los atributos seleccionados se analizaron considerando que cualquiera de las fuentes energéticas podría emplearse para la producción de energía en

determinada región. Sin embargo, existen consideraciones de localización, de espacio físico, accesibilidad, inventario de biodiversidad entre otros aspectos, que deben tenerse en cuenta al momento de masificar la producción de energía con cualquiera de las fuentes no convencionales, razón por la cual se dice que el método de las sumas ponderadas no es la herramienta de decisión técnica definitiva, pero puede emplearse en la etapa de idea o de pre-inversión de un proyecto energético. La tabla 2 resume la jerarquización de cada fuente energética. ^{*1} [24], ^{*2} [25], ^{*3} [26]

Tabla 2. Valoración de las huellas de carbono, hídrica, de la tierra y costo.

Table 2. Footprint values of carbon, water, and land and cost.

Tipos de fuentes	Huella de Carbono (gCO ₂ e/kWh)	Huella Hídrica (m ³ /GJ)	Huella en la Tierra (m ² /GWh)	Costo (Dólar/kWh)	Suma Ponderada	Jerarquización
Factor de Importancia	30	25	15	30		
Carbón ^{*1}	1,347.00	0.365	325	4.81		
<i>Evaluación según escala</i>	2	20	15	15	1235	6
Gas Natural de Ciclo Combinado (GNCC) ^{*2}	466	0.1	623	8.71		
<i>Evaluación según escala</i>	6	20	10	8	1070	8
Turbina de Gas de Ciclo Simple (TGCS) ^{*2}	715	0.1	623	8.71		
<i>Evaluación según escala</i>	4	20	10	8	1010	10
Gas Natural de Ciclo Combinado con captura y secuestro de carbono (GNCC w/CSC) ^{*2}	141	0.1	623	8.71		
<i>Evaluación según escala</i>	8	20	10	8	1130	7
Etanol de Maíz ^{*1}	83	78	11,583.50	3		
<i>Evaluación según escala</i>	10	4	2	20	1030	9
Etanol de Caña de Azúcar ^{*1}	19	2	9,520.00	3		
<i>Evaluación según escala</i>	20	15	4	20	1635	2
Biomasa de astillas de Madera ^{*1}	25	42	18,116.50	7		
<i>Evaluación según escala</i>	15	8	2	10	980	12
Biomasa de Miscanthus ^{*1}	93	37	18,116.50	7		
<i>Evaluación según escala</i>	8	8	2	10	770	13
Termo Solar ^{*1}	9.9	0.4085	510	7		
<i>Evaluación según escala</i>	20	20	10	10	1550	3
Solar Fotovoltaica ^{*1}	58.25	0.042	1,232.00	17.15		
<i>Evaluación según escala</i>	10	20	8	2	980	11
Eólica Onshore ^{*1}	10.7	0.001	2,404.00	4.94		
<i>Evaluación según escala</i>	20	20	6	15	1640	1
Eólica Offshore ^{*1}	15.55	0.001	2,404.00	6.18		
<i>Evaluación según escala</i>	20	20	6	10	1490	4
Nuclear ^{*3}	66.08	0.59	78	5.01		
<i>Evaluación según escala</i>	10	15	20	10	1275	5

En la tabla 2 se observa que la producción de energía eólica Onshore (costa adentro) es la que presenta una mejor calidad ambiental, aunque la calificación de la huella hídrica es alta si se compara con la energía nuclear que es la que presenta el menor valor. Así mismo, la energía eólica onshore y offshore presentan valores de huella de carbono bajos, pero como la energía eólica offshore es más costosa que la onshore, resultó jerarquizada por debajo de la energía termosolar. Se debe tener en cuenta que las fuentes energéticas eólicas analizadas son viables para construcción en regiones costeras o en zonas con alta radiación solar.

Ahora, si se categorizan los resultados de la jerarquización considerando que fuentes energéticas clasificadas entre 1 y 4 son *recomendables*, entre 5 y 8 son *aceptables* y entre 9 y 13 de *dudosa implementación*, tomando los resultados de la tabla 2, las fuentes energéticas onshore, offshore, de etanol a base de caña de azúcar y termosolar serían las más recomendadas aunque para la producción de energía a base de biomasa se requiere un consumo de agua elevado (43.712 Gal /MWh según [13]) frente a las cantidades requeridas en los demás energéticos. Según lo anterior, si las condiciones de generación eólica costeras o en el interior no son viables, la mejor fuente energética sería la termosolar.

Sin embargo, es importante resaltar que el método implementado aquí no está considerando otros factores que pueden llegar a incidir en la selección entre una fuente energética y otra. Ahora bien, en el proceso de jerarquización realizado puede aplicarse por ejemplo para la selección de fuentes energéticas de un mismo tipo, es decir, si se considera la energía a base de biomasa, resulta de mejor calidad ambiental aquella derivada de la caña de azúcar, seguida del maíz y en menor calidad la producida partiendo de astillas de madera o de Miscanthus.

5. CONCLUSIONES

Los criterios de selección de fuentes energéticas alternativas involucran aspectos técnicos objetivos y subjetivos que deben ser considerados cuando se consideran alternativas de inversión en proyectos de generación eléctrica. Se debe recalcar que en estudios de inversión se deben considerar otro tipo de variables y aplicar otros sistemas de selección más complejos. Sin embargo, el método de sumas ponderadas brinda una jerarquización que permite la identificación de la calidad ambiental de diferentes fuentes energéticas en la etapa de idea o de pre-inversión. En este estudio se concluye que la energía eólica y la termosolar resultan viables para procesos de generación no convencional y aunque la energía a base de biomasa partiendo de la caña de azúcar también es ambientalmente favorable, el alto consumo para el riego desestimula su selección.

REFERENCIAS

- [1] A. Montalván Estrada, F. Martínez Luzardo, E. Veitia Rodríguez, O. Brígido Flores, Y. Caparrós Cubeña, "Huella hídrica gris en industrias alimenticias Camagueyana", Revista Cubana de Química, XXII(2), 44-50, 2010.
- [2] V. Novoa, O. Rojas, J. L. Arumí, C. Ulloa, R. Urrutia, A. Rudolph, "Variabilidad de la huella hídrica del cultivo de cereales, río Cachapoal, Chile", Tecnología y Ciencias del Agua, VII(2), 35-50, 2016.
- [3] R. A. Rodríguez, A. Belfort Martínez, S. M. Udaquiola, "Gestión ambiental empresarial: cálculo de la huella de carbono en la industria vitivinícola", Gestión y Ambiente, 17(1), 159-172, 2014.
- [4] S. Giljum, S. Lutter, M. Bruckner, S. Aparcana, State of play of National Consumption based indicators, Sustainable Europe Research Institute SERI, Vienna, 2013.
- [5] W. Wilson, T. Leipzig y B. Griffiths-Sattenspiel, Burning our rivers, River Network, Portland, Oregon, 2012.
- [6] V. Fthenakis, H. Chul Kim, "Life-cycle uses of water in U.S. electricity generation", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(7), 2039-2048, 2010.
- [7] Confederación Sindical de Comisiones Obreras, Impacto ambiental del Sistema de Fracturación Hidráulica para la extracción de gas no convencional, Secretaría de Medio Ambiente, Madrid, 2012.
- [8] J. D. Sáñez Arana, La fracturación hidráulica en la Unión Europea: Estado de la Cuestión, Instituto Español de Estudios Estratégicos, Madrid, 2014.
- [9] D. Harvitt, «Is Natural Gas Toxic in Water?», 19 Marzo 2013. [En línea]. Available: <http://www.ewg.org/environmental/2013/03/natural-gas-toxic-water>. [Último acceso: 15 Febrero 2016].
- [10] A. Zissu, «How to Tackle Fracking in Your Community», 27 Enero 2016. [En línea]. Available: <https://www.nrdc.org/stories/how-tackle-fracking-your-community>.
- [11] A. Lustgarten, «Drill for Natural Gas, Pollute Water», 17 Noviembre 2008. [En línea]. Available: <http://www.scientificamerican.com/article/drill-for-natural-gas-pollute-water/>.
- [12] K. Echenique Mestre, Marco legal y protección ambiental en las etapas de exploración y explotación de la actividad petrolera en Cuba, Andalucía: Universidad Internacional de Andalucía y Universidad de Huelva, 2015, pp 106.

- [13] P. W. Gerben -Leenes, A. Y. Hoekstra, T. Van der Meer, "The water footprint of energy from biomass: a quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio-energy in energy supply", *Ecological Economics*, 68(4), 1052-1060, 2009.
- [14] P. Denholm, M. Hand, M. Jackson, S. Ong, "Land-Use requirements of modern wind power plants in the United States", National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, 2009.
- [15] Energy Information Administration, «Natural Gas and the Environment,» 12 Enero 2016. [En línea]. Available: http://www.eia.gov/energyexplained/?page=natural_gas_environment. [Último acceso: 22 Febrero 2016].
- [16] R. E. H. Sims, N. El Bassam, Biomass and Resources, de Bioenergy Options for a Cleaner Environment: in Developed and Developing countries, R. E. Sims, Ed., Kidlington, Oxford, Elsevier, 2004, pp. 1-26.
- [17] S. A. Abbasi, N. Abbasi, "The likely adverse environmental impacts of renewable energy sources", *Applied Energy*, 65(1-4), 121-144, 2000.
- [18] A. Demirbas, "Combustion characteristics of different biomass fuels", *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(2), 219-230, 2004.
- [19] C. B. Field, J. E. Campbell, D. B. Lobell, "Biomass energy: the scale of the potential resource", *Cell Press*, 23(2), 65-72, 2008.
- [20] O. C. Onar, A. Khaligh, Chapter 2 – Energy Sources, de *Alternative Energy in Power Electronics*, Waltham, Butterworth-Heinemann, 2015, pp. 81-154.
- [21] W. R. Davis, *Air Pollution Engineering Manual*, 2nd Edition, Knoxville: Air & Waste Management Association, 2000.
- [22] S. M. Rashad, F. H. Hammad, "Nuclear power and the environment: comparative assessment of environmental and health impacts of electricity-generation systems", *Applied Energy*, 65, 211-229, 2000.
- [23] E. P. Agency, *Facility Pollution Prevention Guide*, Office of Research and Development Environmental Protection Agency, Washington, 1992.
- [24] S. Hadian y K. Madani, "A system of systems approach to energy sustainability assessment: Are all renewables really green?", *Ecological Indicators*, 52, 194-206, 2015.
- [25] T. Skone, J. Littlefield, J. Mariott, G. Cooney, M. Jamieson, J. Hakian y G. Schivley, *Life Cycle Analysis of Natural Gas Extraction and Power Generation*, Washington D.C.: National Energy Technology Laboratory-Office of Fossil Energy, 2014.
- [26] B. K. Sovacool, "Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey", 36, 2940-2953, 2008.