

DIAGNÓSTICO TERMODINÁMICO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS

Dr.C Roberto Vizcón Toledo¹, MSc. Ing. Nelson López Ripoll²

¹Dpto de Mecánica. Universidad de Matanzas, roberto.vizcon@umcc.cu

² Central Termoeléctrica de Matanzas “Antonio Guiteras Holmes”

Resumen

La caracterización de los sistemas de transformación de la energía tiene un carácter multidimensional y es objetivo de este trabajo resaltar la importancia del diagnóstico termodinámico partiendo de utilizar los indicadores más comunes con criterios de actualidad y otros de nueva formulación tales como la eficiencia termodinámica sostenible a partir de la segmentación o diferenciación del aporte de las tecnologías energéticas, convencionales, renovables y de máximo potencial; y nuevas propuestas para la estimación económica del daño ambiental que provoca el uso de combustibles fósiles. Se presentan resultados para el caso de Cuba en el período 2013-2018 donde se aprecia que entre el (0,6-0,7)% de PIB se emplea en inversiones que reducen el daño ambiental que representan gastos entre (1,1-1,6)\$/GJ.año dados por los consumos de combustible.

Palabras claves: Termodinámica; daño ambiental; termoeconomía; rendimiento energético.

En un contexto global de propiciar el uso racional y eficiente de los recursos energéticos en favor de lograr incrementar las crecientes necesidades del desarrollo y la subsistencia de la humanidad, Cuba mediante la aplicación de regulaciones y normas de carácter nacional e internacional tales como la norma ISO 50001 (Oficina Nacional de Normalización (ONC), 2011) y el Decreto Ley 345 del Consejo de Estado de la República de Cuba (Consejo de Estado de la República de Cuba, 2019) tienen garantías para alcanzar un presente y futuro sostenible.

La Universidad de Matanzas participa con su potencial humano en investigaciones científicas al amparo del PNCTI 05 sobre Desarrollo Energético Integral y Sostenible (González, 2020) en el cual desarrollan tareas científicas sobre la temática relativa a las tecnologías energéticas.

La caracterización cuantitativa y cualitativa de las transformaciones de la energía de una tecnología energética, como sistema objeto de estudio, propicia la comprensión de su funcionamiento y la identificación de las formas de perfeccionarlo. Esto es posible al aplicar las leyes de la termodinámica al sistema objeto de estudio. La necesariamente muy extensa bibliografía existente para los estudios de la termodinámica aplicada demuestran que esta problemática requiere de una constante reflexión científica.

La utilización de un grupo de índices termodinámicos, económicos y ambientales relacionados con la economía, eficiencia, racionalidad y sostenibilidad de los sistemas energéticos vistos de manera integrada permiten la mejor identificación o caracterización de los procesos que tienen lugar (Cengel Y. A., 2014), (Bravo, 2019), (Valero A., 1999), (Vizcón, 2013), (Qun & Chen, 2013), (Rodríguez, 2020), (Kwak, 2020). En este trabajo se propone considerar para el diagnóstico termodinámico de un sistema energético los indicadores siguientes:

I.	Eficiencia termodinámica energética -Nen	(%)
II.	Eficiencia termodinámica exergética -Nex	(%)
III.	Costo exergético -Cex	(adim)
IV.	Eficiencia termodinámica sostenible -Neg	(%)
V.	Pérdida de capacidad de realizar trabajo termodinámico	(kW)
VI.	Variación de entropía del sistema termodinámico	(kW/K)
VII.	Eficiencia energética efectiva -Nef	(%)
VIII.	Renovabilidad de la energía -Ren	(%)
IX.	Renovabilidad de la exergía -Rex	(%)
X.	Intensidad energética -IE	(kg/\$)
XI.	Gasto energético unitario -Ce _u	(MJ/u)
XII.	Gasto financiero energético relativo -Cen	(\$/\$)
XIII.	Costo exergoeconómico de la exergía útil -CE _x	(\$/GJ)
XIV.	Costo exergoeconómico de la exergía destruida y pérdida -CE _x	(\$/GJ)
XV.	Estimación económica del daño ambiental -Cd	(\$/GJ.a)
XVI.	Emisiones de gas C02 -G _{C02}	(t/año)
XVII.	Huella ecológica -Hecol	(ha/a)

XVIII.	Costo de ciclo de vida	(\$)
XIX.	Costo nivelado de energía	(\$/kWh)
XX.	Indicadores del método de eMergético	(adim)
XXI.	Variación de entransía del sistema termodinámico	(kW.K)

De los indicadores para el diagnóstico termodinámico antes mencionados se desarrollarán solamente tres de ellos, estos son:

- I. La eficiencia termodinámica energética
- IV. La eficiencia termodinámica sostenible
- XV. La estimación económica del daño ambiental por uso de la energía de origen fósil

La explicación detallada de cada uno de los índices mencionados se expresa a continuación.

I. Eficiencia termodinámica energética

Las transformaciones entre las diferentes formas de la energía en las que generalmente se parte de un gasto energético para obtener una cierta cantidad de energía de forma utilizable lleva, siempre implícito, el concepto de eficiencia termodinámica de la transformación energética.

El rendimiento termodinámico energético (N) en un sistema de transformación de la energía plantea que:

$$N = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{ent}}} \quad (1)$$

Donde:

E_{útil}: es la energía útil producida por el sistema termodinámico

E_{ent}: es la energía disponible que entra o se gasta en el sistema termodinámico

Las formas de energía son muy conocidas, una primera clasificación las distingue por sus orígenes como renovables y no renovables, esta última se obtiene a partir de combustibles fósiles que se encuentran en una inminente situación de agotabilidad y uso principal. Por sus formas la energía puede ser eléctrica, química, mecánica, térmica, hidráulica, nuclear, eólica, solar, termoceánica, mareomotriz, geotérmica entre otras de usos conocidos.

Es posible establecer la equivalencia energética entre diferentes portadores de energía a partir de expresarlas todas ellas relacionadas con la cantidad de energía almacenada por un combustible tipo petróleo equivalente, esto se aprecia en la siguiente conversión energética:

Equivalencia energética (tonelada equivalente-toe) del combustible convencional. Marzo/2020.

- 1 toe (tonelada equivalente) 43,26 GJ
- 1 barril 159 l.
- 1 toe de petróleo crudo 6,29 barriles
- 1 t diesel 1,0534 toe
- 1 t gasolina 1,0971 toe

- 1 t gas licuado (GLP) 1,163 toe
- 1 MWh de energía eléctrica 0,270 toe
- 1 barril de petróleo crudo 15 USD.

IV. Eficiencia termodinámica sostenible -Neg

Los textos clásicos de la termodinámica, tales como (Cengel Y. A., 2014), (Bejan, 1996) , (Moran MJ, 2000), (Cengel C. T., 2017), (Moran, 2018), (Powers, 2017) entre muchos, no abordan el concepto de rendimiento energético según la 1ra Ley de la termodinámica con la formulación segmentada o subdividida en: energías renovables y no renovables; y tampoco con la consideración del uso, o no uso, de las tecnologías energéticas de máximo potencial. De manera general también teniendo en cuenta todos los aspectos distintivos antes mencionados

A. Rendimiento energético con enfoque dirigido a la diferenciación de uso de fuentes de energía renovables y no renovables.

El rendimiento termodinámico energético (N) en un sistema de transformación de la energía plantea que:

$$N = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{ent}}} \quad (2)$$

Donde:

$E_{\text{útil}}$: es la energía útil producida por el sistema termodinámico

E_{ent} : es la energía disponible que entra o se gasta en el sistema termodinámico

Pero si se identifican los gastos de energía del sistema a partir de su origen (Vizcón, 2013) se podrá precisar al mismo tiempo las sostenibilidad y eficiencia del sistema de transformación objeto de estudio. Entonces desdoblado la fuente de energía de entrada se tiene:

$$E_{\text{ent}} = (E_{\text{ent}_r} + E_{\text{ent}_{nr}}) \quad (3)$$

$$N_{ur} = \frac{E_{\text{ent}_r}}{E_{\text{útil}}} ; \text{Factor de conversión de la ER en } E_{\text{útil}} ; \text{es } \geq \text{cero} \quad (4)$$

$$N_{un} = (E_{\text{ent}_{nr}} / E_{\text{útil}}) ; \text{Factor de conversión de la ENR en } E_{\text{útil}} ; \text{es } \geq \text{cero} \quad (5)$$

Finalmente queda que:

$$N = Neg = \frac{1}{(N_{ur} + N_{unr})} ; \text{Sus valores entre 0 y 1} \quad (6)$$

Comentarios relativos a este nuevo enfoque:

1. Si N_{nr} es cero, entonces el sistema funciona con gastos de energía renovable lo cual presupone un sistema energético sustentable.
2. Si N_{ur} es cero, entonces el sistema funciona con gastos de energía cuyas fuentes primarias son de origen fósil, esto presupone un sistema energético no sustentable y que deteriora aceleradamente el medio ambiente.

Véase la figura siguiente:

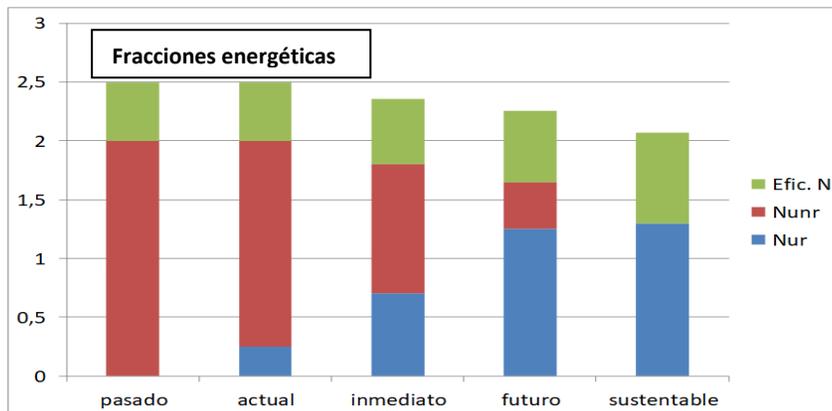


Figura 1. Fuente: elaboración propia (Vizcón, 2013).

Se aprecian tendencias en la línea del tiempo tales como:

- aumento de la eficiencia termodinámica sostenible ($Neg=N$)
- mayor uso de: las fuentes renovables de energía y de las tecnologías energéticas de máximo potencial
- menor utilización de las energías de origen fósil
-

B. Rendimiento energético con enfoque dirigido a la diferenciación de uso de tecnologías energéticas de máximo potencial (TEMP).

Se entiende por tecnologías energéticas de máximo potencial (TEMP) aquellas que transforman la energía de entrada en energía utilizable con los valores máximos posibles del rendimiento termodinámico. El análisis segmentado o subdividido al aplicar la 1ra. Ley de la Termodinámica teniendo en consideración el uso, o no uso, de las TEMP al diferenciar los gastos de energía de entrada al sistema termodinámico conllevará a una formulación igual a la descrita anteriormente en aspecto IV. A, al distinguir el uso, o no uso, de las fuentes renovables de energía, por tanto el resultado final será del mismo tipo, teniéndose que:

$$E_{ent} = E_{ent_mp} + E_{ent_conv} \quad (7)$$

Si se define que:

$$Nump = \frac{E_{ent}}{E_{\text{útil}}} ; \text{Factor de conversión de la } E_{ent_mp} \text{ en } E_{\text{útil}} ; \text{ es } \geq \text{cero} \quad (8)$$

$$Nuconv = \frac{E_{ent_conv}}{E_{\text{útil}}} ; \text{Factor de conversión de la } E_{ent_conv} \text{ en } E_{\text{útil}} ; \text{ es } \geq \text{cero} \quad (9)$$

$$Neg = N = \frac{1}{(Nump + Nuconv)} ; \text{Sus valores entre 0 y 1} \quad (10)$$

Comentarios relativos a este nuevo enfoque:

1. Si Nuconv es cero, entonces el sistema funciona con gastos de energía mediante el uso de tecnologías energéticas de máximo potencial lo cual presupone un sistema energético sustentable.
2. Si Nump es cero, entonces el sistema funciona con gastos de energía cuyas fuentes primarias son utilizadas por tecnologías energéticas convencionales esto presupone un sistema energético no sustentable y que deteriora aceleradamente el medio ambiente.

C. Rendimiento energético con enfoque dirigido a la diferenciación de uso de tecnologías energéticas: convencional, de máximo potencial y de fuentes renovables de energía.

Partiendo del mismo esquema de análisis termodinámico segmentando las tecnologías energéticas en tres grupos quedará que:

$$E_{ent} = (E_{ent_mp} + E_{ent_conv} + E_{ent_r}) \quad (11)$$

Si se define que:

$$Nump = \frac{E_{ent_mp}}{E_{\text{útil}}} ; \text{Factor de conversión de la } E_{ent_mp} \text{ en } E_{\text{útil}} ; \text{ es } \geq \text{cero} \quad (12)$$

$$Nuconv = \frac{E_{ent_conv}}{E_{\text{útil}}} ; \text{Factor de conversión de la } E_{ent_conv} \text{ en } E_{\text{útil}} ; \text{ es } \geq \text{cero} \quad (13)$$

$$Nur = \frac{E_{ent_r}}{E_{\text{útil}}} ; \text{Factor de conversión de la } E_{ent_r} \text{ en } E_{\text{útil}} ; \text{ es } \geq \text{cero} \quad (14)$$

$$Neg = N = \frac{1}{(Nump + Nuconv + Nur)} ; \text{Sus valores entre 0 y 1} \quad (15)$$

Comentarios relativos a este nuevo enfoque:

1. Si Nuconv es cero, entonces el sistema funciona con gastos de energía mediante el uso de tecnologías energéticas de máximo potencial y las renovables, lo cual presupone un sistema energético sustentable.

2. Si N_{mp} es cero, entonces el sistema funciona con gastos de energía cuyas fuentes primarias son utilizadas por tecnologías energéticas convencionales y las renovables esto presupone un sistema energético parcialmente sustentable y que deteriora moderadamente el medio ambiente.
3. Si N_r es cero, entonces el sistema funciona con gastos de energía cuyas fuentes primarias son utilizadas por tecnologías energéticas no renovables con presencia de las tecnologías energéticas de máximo potencial, esto presupone un sistema energético parcialmente sustentable y que deteriora moderadamente el medio ambiente.

D. Rendimiento energético con enfoque dirigido a la diferenciación de uso de tecnologías energéticas: convencional, de máximo potencial y de fuentes renovables de energía como sistemas independientes

Considerando un sistema termodinámico formado por tres subsistemas de los tres tipos descritos se obtiene para el rendimiento termodinámico las siguientes expresiones:

$$N = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{ent}}} \quad (16)$$

Para:

$$E_{\text{ent}} = E_{\text{ent}_{mp}} + E_{\text{ent}_{conv}} + E_{\text{ent}_r} \quad (17)$$

$$E_{\text{útil}} = E_{\text{útil}_{mp}} + E_{\text{útil}_{conv}} + E_{\text{útil}_r} \quad (18)$$

Para cada sistema termodinámico independiente se tienen sus rendimientos a partir de:

$$N_{mp} = \frac{E_{\text{útil}_{mp}}}{E_{\text{ent}_{mp}}} \quad (19)$$

$$N_{conv} = \frac{E_{\text{útil}_{conv}}}{E_{\text{ent}_{conv}}} \quad (20)$$

$$N_r = \frac{E_{\text{útil}_r}}{E_{\text{ent}_r}} \quad (21)$$

También se define la fracción de energía involucrada en la transformación de cada subsistema:

En la entrada:

$$G_{mp} = \frac{E_{\text{ent}_{mp}}}{E_{\text{ent}}} \quad ; \text{ donde } G_{mp} \text{ es la fracción para la energía } mp \quad (22)$$

$$G_{conv} = \frac{E_{\text{ent}_{conv}}}{E_{\text{ent}}} \quad ; \text{ donde } G_{conv} \text{ es la fracción para la energía } conv \quad (23)$$

$$Ger = Ree = \frac{E_{ent-r}}{E_{ent}}; \text{ donde Ger es la renovabilidad de la energía de entrada} \quad (24)$$

$$Gemp + Geconv + Ger = 1 \quad (25)$$

En la salida:

$$Gsm = \frac{E_{útil-mp}}{E_{útil}} \quad (26)$$

$$Gsconv = \frac{E_{útil-conv}}{E_{útil}} \quad (27)$$

$$Gsr = Res = \frac{E_{útil-r}}{E_{útil}}; \text{ donde Res es la renovabilidad de la energía de salida} \quad (28)$$

$$Gsm + Gsconv + Gsr = 1 \quad (29)$$

Entonces se puede decir que el rendimiento termodinámico del sistema a partir de cada subsistema independiente queda como:

$$N = (Gemp \cdot Nmp) + (Geconv \cdot Nconv) + (Ger \cdot Nr) \quad (30)$$

Comentarios relativos a este nuevo enfoque:

1. Si Nconv es cero, entonces el sistema funciona con gastos de energía renovable y también de máximo potencial, lo cual presupone un sistema energético sustentable.
2. Si Nr y Nmp son cero, entonces el sistema funciona con gastos de energía cuyas fuentes primarias son de origen fósil, esto presupone un sistema energético no sustentable y que deteriora aceleradamente el medio ambiente.

Véase figura 2 con el comportamiento de la ecuación anteriormente descrita:

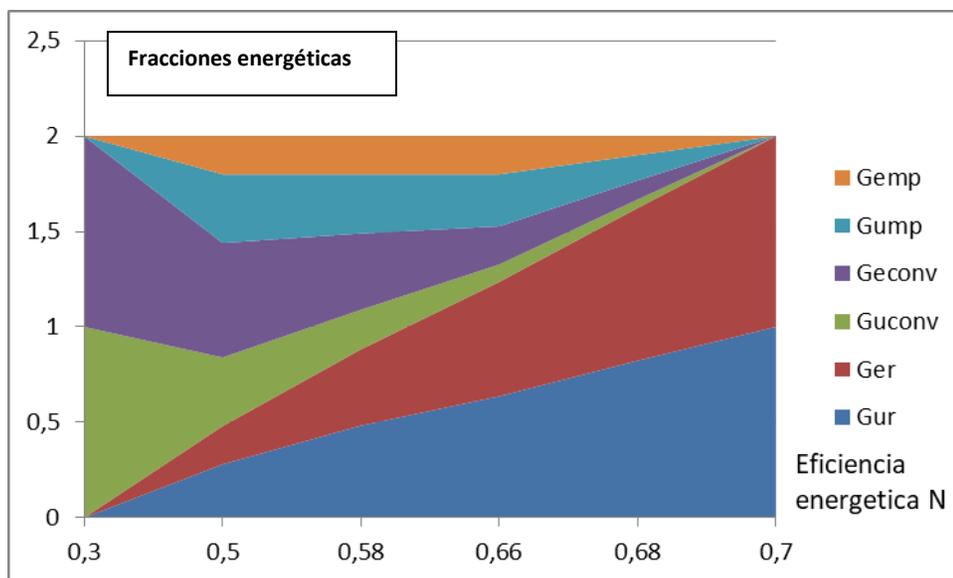


Figura 2. Fuente: elaboración propia.

Se aprecian tendencias en la línea de incremento de la eficiencia termodinámica sostenible, tales como:

- mayor uso de: las fuentes renovables de energía y de las tecnologías energéticas de máximo potencial
- menor utilización de las energías de origen fósil

XV. Estimación económica del daño ambiental –Cd

A partir del inicio de la revolución industrial en Europa hace más de 150 años con el uso de las máquinas térmicas alimentadas por combustible de origen fósil apareció y continúa en la actualidad, una carrera ilimitada que ha estado afectando la vida a escala mundial por los cambios que se producen en el ecosistema que en su mayor parte se conocen como daños ambientales.

Los científicos identifican que las regulaciones a favor de la protección ambiental no siempre son acogidas con satisfacción por las comunidades humanas (Hsiang, 2019).

Desde finales del siglo XX Instituto de Investigaciones del Hidrógeno de la Florida, según (Barbir, 1990), fueron los pioneros en el propósito de cuantificar financieramente los daños que provoca el uso de combustibles de origen fósil. A partir de entonces se han desarrollado diferentes metodologías al respecto entre las cuales se señalan las 9 siguientes:

1. Según (Veziroglu, 1998) , se planteó el estudio para 8 grupos de daños que consideran en total 33 tipos de ellos:

Estimación económica del daño ambiental por el uso de combustibles fósiles. Año 1998.

Tipo de combustible	\$(GJ.año)
Carbón	14,51
Petróleo	12,52
Gas natural	8,26
(Promedio de todos)	12,05

Se considera que el promedio de los daños económicos estimados respecto al producto interno bruto mundial es de 11%. Ver la siguiente tabla I.

Tabla 1. Daño ambiental estimado económicamente por tipo de combustibles fósiles

Table I. Environmental Damage Caused by Each of Fossil Fuels.

Type of Damage (n)	Environmental Damage 1998 \$ per GJ					
	Coal		Petroleum		Natural Gas	
	Itemized Damage	Sub-Totals	Itemized Damage	Sub-Totals	Itemized Damage	Sub-Totals
<i>Effect on Humans</i>						
Premature deaths	1.75		1.42		1.05	
Medical Expenses	1.75		1.42		1.05	
Loss of working efficiency	1.66		1.35		0.99	
<i>Effect on Animals</i>		0.75		0.63		0.45
Loss of domestic live stock	0.25		0.21		0.15	
Loss of wildlife	0.50		0.42		0.30	
<i>Effect on Plants and Forests</i>		1.99		1.61		1.20
Crop yield reduction -ozone	0.25		0.21		0.15	
Crop yield reduction - acid rains	0.13		0.10		0.07	
Effect on wild flora (plants)	0.77		0.62		0.46	
Forest decline (economic value)	0.27		0.22		0.16	
Forest decline (effect on biological diversity)	0.53		0.43		0.33	
Loss of recreational value	0.04		0.03		0.03	
<i>Effect on Aquatic Ecosystems</i>		0.26		1.55		0.16
Oil spills	-		0.44		-	
Underwater tanks leakages	-		0.90		-	
Liming lakes	0.04		0.03		0.03	
Loss of fish population	0.04		0.03		0.03	
Effect on biological diversity	0.18		0.15		0.10	
<i>Effect on Man-Made Structures</i>		1.66		1.34		0.98
Historical buildings and monuments degradation	0.18		0.15		0.10	
Buildings and houses' detriment	0.37		0.30		0.22	
Steel constructions corrosion	0.99		0.80		0.59	
Sailing of clothes, cars, etc.	0.12		0.09		0.07	
<i>Other Air Pollution Costs</i>		1.45		1.16		0.88
Visibility reduction	0.30		0.23		0.18	
Air pollution abatement costs	1.15		0.93		0.70	
<i>Effect of Strip Mining</i>		0.73		-		-
<i>Effect of Climactic Changes</i>		2.04		1.66		1.22
Heat waves - effects on humans	0.27		0.22		0.16	
Droughts -						
Agricultural losses	0.16		0.13		0.10	
Livestock losses	0.13		0.10		0.07	
Forests losses	0.16		0.13		0.10	
Wild flora and fauna losses	0.93		0.75		0.56	
Water shortage and power production problems	0.25		0.21		0.15	
Floods	0.07		0.06		0.04	
Storms, hurricanes, tomadoes	0.07		0.06		0.04	
<i>Effect of Sea Level Rise</i>		0.47		0.38		0.28
TOTALS		14.51		12.52		8.26

Se impone buscar índices para extrapolar la propuesta de Veziroglu de 1998 hasta los años (2005-2010-2015-2020). Por ejemplo la información a considerar puede ser:

- emisiones de procesos de combustión
- factor de aire atmosférico limpio (ARF)
- temperatura promedio anual
- nivel del mar
- amplitud de la capa de ozono
- magnitud de los deshielos
- fracción de deforestación
- disminución de cantidad de especies vivas
- aumento de la desertificación
- desarrollo de epidemias,
- fenómenos climáticos (ciclones, tsunamis, terremotos, tornados, etc).

Para con estos valores proceder a calcular las pendientes de las funciones correspondientes en función del tiempo y obtener los valores para cálculos en la actualidad del daño estimado por uso de combustibles fósiles.

2. Propuesta de estimación daños ambientales por el cambio climático según Tol (TOL, 2002)

Se propone una metodología que estima financieramente los impactos del cambio climático a nivel global y por 9 regiones diferentes (América, Europa y Pacífico) objeto de estudio partiendo del cambio climático y las vulnerabilidades existentes. Se considera como variables de entrada el PIB per cápita, población total así como la estructura económica. Se estima el período comprendido entre los años 2000 hasta el 2200. Las dimensiones estudiadas abarcan la agricultura y Silvicultura, las fuentes naturales de agua y los consumos de combustibles, el cambio de nivel del mar y situación de los ecosistemas, así como las enfermedades cardiovasculares y respiratorias. Los costos totales estimados pueden alcanzar que superen incluso el 8% del PIB según sea la región.

Respecto a los costos relacionados con el consumo de combustibles se reporta que existe cierta dependencia lineal entre los cambios de la temperatura media global y las necesidades de satisfacción de enfriamiento y calentamiento de los ambientes de trabajo y vida. Al respecto se utilizan ecuaciones para las proyecciones de gastos anuales estimados ($SH_{t,r}$) por estas razones mediante la ecuación 31 que se aprecia a continuación:

$$SH_{t,r} = \alpha_r T_t^\beta \left(\frac{y_{t,r}}{y_{t,1990}} \right)^\epsilon \left(\frac{P_{t,r}}{P_{t,1990}} \right) \prod_{s=1990}^t AEEI_{s,r} \quad (31)$$

Donde:

SH expresa la cantidad de dinero (usd/año) a gastar en nuevos espacios de calentamiento o enfriamiento; **t** es el tiempo (año objeto de estudio); **r** es la región geográfica; **s** es el año base o de referencia para cálculos; **T** es el cambio de la temperatura (K) media global en el año 1990; **y** es el PIB per cápita; **P** es la población total; **α** es un parámetro tabulado de costo anualizado (tasa en fracción); **β** es un parámetro que oscila entre (0,5–1,5); **ε** es un parámetro cuyo valor oscila entre (0,6–1,0); **AEEI** es un parámetro que es alrededor de 1% por año en 1990, que converge hasta 0,2% anual en el 2200.

A partir de la formulación anterior se muestra el valor calculado del daño anual estimado (% de PIB o GNP) producto del cambio climático según las figuras 3 y 4 siguientes:

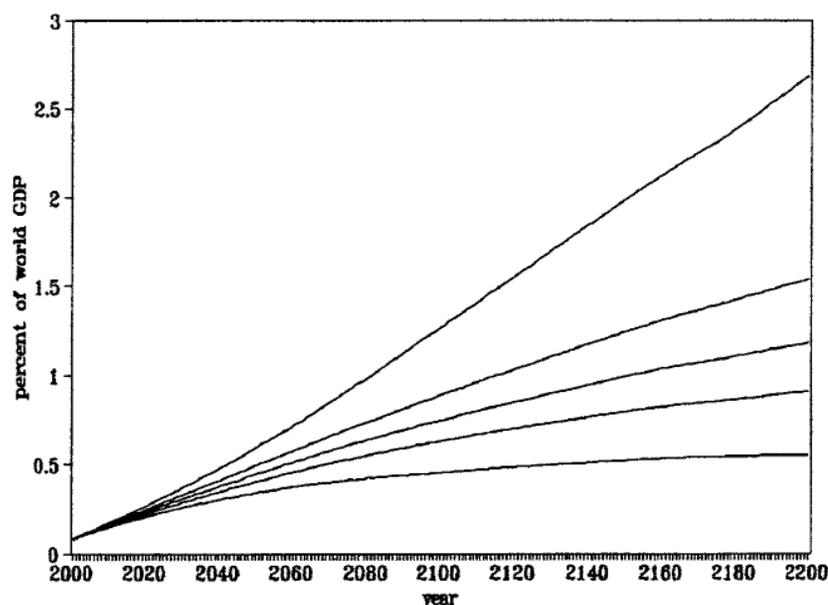


Figura 3. Para calentamiento. Fuente (TOL, 2002).

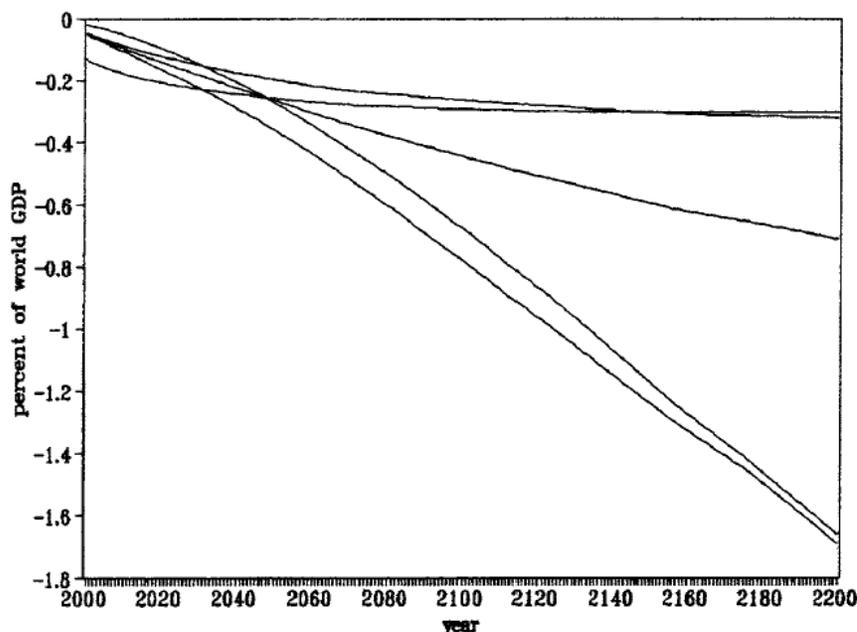


Figura 4. Para enfriamiento. Fuente (TOL, 2002).

3. En su tesis doctoral de Cuba, (Ocañas, 2006) planteó una metodología que cuantifica integralmente los daños ambientales por uso de la energía a partir del criterio sobre la Sostenibilidad Energética Ambiental. Se parte de valorar la incidencia de cuatro factores necesarios que son:

- *Grado de renovabilidad de la energía consumida en el sistema, α
- *Eficiencia de las transformaciones energéticas, β
- *Grado de limpieza de la energía consumida, γ
- *Grado de Auto abastecimiento energético territorial del sistema, λ

Donde los factores de peso de cada uno son: σ_α , σ_β , σ_γ , y σ_λ

El mismo Ocañas propone entonces, como índice de sostenibilidad energético ambiental (**Ise**) la expresión matemática siguiente:

$$\mathbf{Ise} = \sigma_\alpha * \alpha + \sigma_\beta * \beta + \sigma_\gamma * \gamma + \sigma_\lambda * \lambda \quad (32)$$

El valor calculado de **Ise** siempre será un número menor que uno, pues en ningún caso las transformaciones energéticas logran la perfección termodinámica y ambiental.

4. Otra propuesta de valoración económica de los daños ambientales según (Rubio, 2007), la propuso la CEPAL en el 2003, relacionando esto con el concepto de desarrollo energético sostenible. Véase a continuación el método descrito.

Hablando entonces en términos de desarrollo energético sostenible, los costos totales de la producción de energía debieran determinarse entonces como:

$$C_t = C_i + C_e$$

Donde:

C_t - Costos totales, \$/kWh.

C_i - Costos internos, \$/kWh.

C_e - Costos externos, \$/kWh.

Estimados de Costos Externos (USD cents / kWh

Categoría	Carbón	Petróleo	Ciclo Comb. Turbinas Gas	Nuclear	Eólica
Salud humana/ accidentes	0.7 - 4.00	0.7 - 4.80	0.10 - 0.20	0.03	0.04
Cultivos / flora	0.07 - 1.5	1.6	0.08	pequeña	0.08
Edificaciones	0.15 - 5.00	0.2 - 5.00	0.05 - 1.8	pequeña	0.10 - 0.33
Desastres	-	-	-	0.11 - 2.50	-
Daños globales	0.05 - 24.0	0.5 - 1.3	0.3 - 0.7	0.02	0.018
Totales	1.70 - 40.0	3.7 - 18.7	0.83 - 1.86	0.36 - 50	0.4 - 1.00

ESTIMADOS DE COSTOS INTERNOS POR TECNOLOGIA

TECNOLOGÍA	COSTO PROMEDIO DE GENERACIÓN (centavos de dólar/kWh)	INVERSIÓN PROMEDIO (dólar/Watt)
Ciclo Combinado a Gas	3.5 (3.0 -4.0)	0.6 (0.4 -0.8)
Carbón	4.8 (4.0 -5.5)	1.2 (1.0 -1.3)
Nuclear	4.8 (2.4 -7.2)	1.8 (1.6 -2.2)
Eólico	5.5 (3.0 -8.0)	1.4 (0.8 -2.0)
Biomasa (25 MW combustión)	6.5 (4.5 -8.5)	2.0 (1.5 -2.5)
Geotermia	6.5 (4.5 -8.5)	1.5 (1.2 -1.8)
Pequeñas hidro	7.5 (5.0 -10.0)	1.0 (0.8 -1.2)
Fotovoltaica	55.0 (30.0 -80.0)	7.0 (6.0 -8.0)

Fuente: Proyecto CEPAL/GTZ, "Promoción del desarrollo Económico en América Latina y el Caribe por medio de la Integración de Políticas Ambientales y Sociales", CEPAL 2003.

La información anterior se complementó, por no estar relacionada la tecnología energética termoceánica, con los siguientes resultados:

TECNOLOGÍA	COSTO PROMEDIO DE GENERACIÓN (centavos de dólar por kWh)	INVERSIÓN PROMEDIO (dólar/W)
Termoceánica:		
-Solo electricidad	menos de 5	50 (10-60)
- Uso combinado (calor, electricidad, minerales, frío, agua, etc)	menos de 3	15 (10-30)

Fuente: elaboración propia: Universidad de Matanzas. (Grupo nacional de energía del mar, 2010)

- Según (Cuesta, 2007) en su tesis doctoral se plantea una metodología para calcular los sistemas que garantizan la sostenibilidad de una tecnología energética a partir de la reducción de los daños ambientales, esto se ve en la figura 5 siguiente:

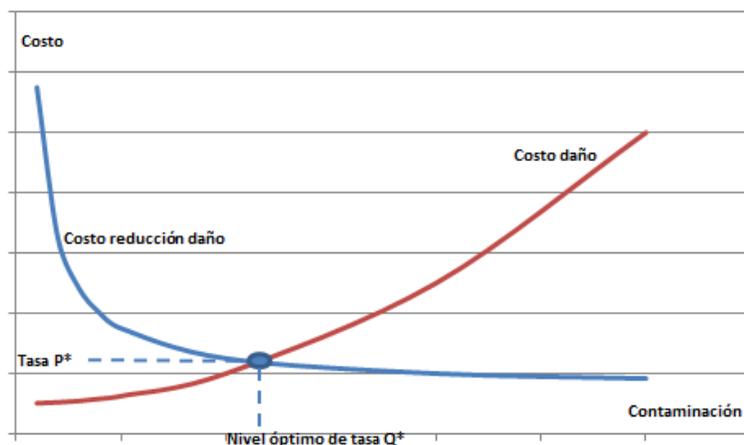


Figura 5. Fuente: (Cuesta, 2007)

La metodología desarrollada parte de caracterizar la tecnología energética a partir de los siguientes 8 indicadores de sostenibilidad, estos son:

- Indicador IS1: participación específica de las energías fósiles en la producción de electricidad
- Indicador IS2: participación específica de las energías renovables en la producción de electricidad
- Indicador IS3: participación específica de las energías no emisoras de CO2 en la producción de electricidad
- Indicador IS4: consumo final de electricidad por sectores de energía

- Indicador IS5: consumo final de energía por sectores
- Indicador IS6: emisiones totales de CO₂, metano y N₂O
- Indicador IS7: emisiones de CO₂, metano y N₂O por kilovatio-hora producido
- Indicador IS8: precio final de la electricidad

También relaciona según las regiones geográficas y globalmente los costes externos por daños ambientales estimados a partir de las emisiones de gases de efecto invernadero que se muestran a continuación:

Tabla 2. Costos estimados para emisiones de gases de efecto invernadero

Tipo de emisión de combustión de petróleos (Nivel global)	Costo máximo estimado del daño (\$/t)	Costo mínimo estimado del daño (\$/t)
CO ₂	4,1	1,4
CH ₄	71,5	28,2
N ₂ O	1272,1	440,2

6. Los trabajos de (Vizcón, 2013), (Vizcón, 2018) a partir de lo planteado por Veziroglu y de informes publicados en internet de la oficina nacional de estadística cubana (ONE) donde se encuentran tablas de valores anuales de consumos de combustibles de origen fósil, del PIB per cápita y de los gastos monetarios para atenuar los daños que la naturaleza ocasionó a Cuba en dichos períodos, se resumen esto en la tabla siguiente:

Algunos índices económicos, energéticos y ambientales de Cuba en el 2016 se expresan a continuación, ver tabla 3:

Tabla 3. Índices calculados a partir de información (Oficina nacional de estadísticas de Cuba, 2016)

El producto interno bruto (millones \$)	91 370
Consumo total de combustibles (millones toe); Proviene de producción nacional	8,701 4,06
Potencia eléctrica instalada (MW); De ella en grupos electrógenos (40,2%)	6 454 2 525
Generación total de energía eléctrica (GWh); De ella en grupos electrógenos (20,7%)	20 459 4 242
Consumo de energía total (GJ/habitante); De ella por energía eléctrica (16,4%)	40,4 6,55
Gastos en inversiones por protección de medio ambiente (millones \$)	623,4
Superficie plantada de nuevos árboles (miles ha); Para un crecimiento de bosques (%)	19,750 0,61
Reforestación para cubrir daños estimados por la huella ecológica para absorber el CO2 (miles ha)	14,34
Generación eléctrica (kWh/habitante), incluye todos los servicios del país	1820,3

Daño ambiental estimado, para la cantidad de combustible fósil empleado:	
- según el PIB anual (%)	0,63
- según gastos de inversiones por protección ambiental (\$/GJ.año)	1,71
[Véase que es menor que 12,05 total, dado por (Veziroglu, 1998)]	

Fuente: Oficina nacional de estadística de Cuba y elaboración propia.

7. En su tesis doctoral, el doctor cubano (Bravo, 2019) planteó una metodología para valorar la sostenibilidad de la gestión de residuos agrícolas con fines energéticos. Con tal propósito desarrolló una metodología que integra herramientas de la economía ecológica con un enfoque multicriterio y la sostenibilidad de una tecnología energética renovable, emplea las herramientas de análisis de ciclo de vida, análisis exergético y análisis emergético.

Los pasos que se llevan a cabo por la metodología son:

- a. Análisis de Ciclo de Vida Ambiental. Evaluación de impactos sobre las categorías intermedias. Evaluación de categorías de daño final
- b. Análisis Exergético
- c. Análisis Emergético
- d. Análisis de pre factibilidad económico financiera de la alternativa seleccionada
- e. Selección de la alternativa más sostenible con un enfoque multicriterio. Análisis de Decisiones Multicriterio

De particular y novedoso interés resultan la cuantificación del análisis emergético mediante sus índices, tales como:

ÍNDICES EMERGÉTICOS

Energía usada (Y)

$$Y = R + NR + F \quad (33)$$

Donde:

R- Flujos de energía renovables; NR - Flujos de energía no renovables y F- flujos de energía importados

El índice de carga ambiental (ELR, por sus siglas en inglés *Enviromental Loading Ratio*)

$$ELR = \frac{(NR + F)}{R} \quad (34)$$

Donde:

ELR- Índice de carga ambiental; NR - Flujos de energía no renovables; F- flujos de energía importados y R- Flujos de energía renovables.

El índice de rendimiento energético (EYR, por sus siglas en inglés *Emergy Yield Ratio*).

$$ELR = \frac{(NR + F + R)}{F} \quad (35)$$

Donde:

EYR- Índice de rendimiento energético; R- Flujos de energía renovables; NR- Flujos de energía no renovables y F- flujos de energía importados.

El índice de inversión energética (EIR, por sus siglas en inglés *Emergy Investment Ratio*).

$$EIR = \frac{(F)}{(R + NR)} \quad (36)$$

Donde:

EIR- Índice de inversión energética; R- Flujos de energía renovables; NR- Flujos de energía no renovables y F- flujos de energía importados

Índice de energía renovable capturada (ERC, *Renewable energy captured*)

$$ERC = R/F \quad (37)$$

Donde:

ERC- Índice de energía renovable capturada; R- Flujos de energía renovables y F- flujos de energía importados

Índice de la fracción renovable de la energía utilizada, (R/Y)

$$\frac{R}{Y} = \frac{R}{(R + NR + F)} \quad (38)$$

Donde:

R/Y- Índice de la fracción renovable de la energía utilizada; R- Flujos de energía renovables; NR- Flujos de energía no renovables y F- flujos de energía importados.

Índice Energía-Dinero (*Emergy to Money ratio, EMR*)

$$EMR = \frac{Y}{PM} \quad (39)$$

Donde:

EMR- Índice Emergía – Dinero; Y- Emergía usada y PM Valor monetaria del producto obtenido

Índice de tasa de cambio emergético (EER, por sus siglas en inglés, *Emergy Exchange Ratio*)

$$EER = \frac{(NR + R + F)}{(\text{Precio comercial del producto} \bullet EMR)} \quad (40)$$

Donde:

EER - Índice de la tasa de cambio emergético; R- Flujos de emergía renovables; NR-Flujos de emergía no renovables; F- Flujos de emergía importados y EMR- Índice Emergía – Dinero.

El índice de sostenibilidad (ESI, por sus siglas en inglés, *Emergy Sustainable Indicators*).

$$ESI = \frac{EYR}{ELR} \quad (41)$$

El índice de emergía por unidad (T) o transformidad del producto o servicio final.

$$T = \frac{(R + NR + F)}{E} \quad (42)$$

Donde:

T- transformidad del producto; R- Flujos de emergía renovables; NR- Flujos de emergía no renovables; F- flujos de emergía importados y E- Cantidad de producto obtenido.

8. Según (Hsiang, 2019), quien hace más de 10 años viene abordando esta temática, la estructura del problema de estimación del daño o perjuicio ambiental está asociado a las externalidades percibidas indistintamente por los diferentes segmentos biótico y abiótico, relacionados con el hábitat que conforman un todo ecosistémico.

Se considera que la conceptualización parte de tener en cuenta las externalidades asociadas a determinados procesos que tienen lugar en un ecosistema y como resultado se obtienen daños y beneficios.

Para estimar el costo social de los daños se emplea una función general f() que depende dos variables, estas son:

- El nivel o tipo de exposición e sobre la condición ambiental
- El vector atributo x que cuantifica la influencia que ejerce un tipo exposición dado sobre el buen desempeño económico

$$\text{Daño} = f(e, x)$$

Donde:

$f()$: es función que representa la cuantía en que los atributos provocan daños al bienestar que deben ser retribuidos o pagados

Se define la exposición e al estado en tiempo y espacio de un punto arbitrario del ambiente, por ejemplo son niveles de exposición:

1. Cantidad física de contaminantes atmosféricos,
2. Deforestación y (o)
3. Temperatura local en tiempo real respecto a la promedio

Normalmente la exposición e es medida por una unidad de cantidad física que describe alguna dimensión ambiental del ecosistema en cuestión, tales como partes por millón para contaminación del aire, área deforestada por servicios ecosistémicos, y temperatura máxima diaria del clima.

A su vez, el atributo x es básicamente la pendiente de la función de daño específico $f()$ dado por el atributo x y para la exposición e .

Por ejemplo, si se evalúa una función general $f()$ para los tres tipos de exposición o daño antes mencionados, se tendría que:

$$F_{tot} = f_1 + f_2 + f_3 = e_1 \cdot x_1 + e_2 \cdot x_2 + e_3 \cdot x_3 = e_m \cdot x_m ; \$ / \text{año} \quad (43)$$

e_1 ; \$/kg contaminantes atmosféricos

x_1 ; kg contaminantes/año

e_2 ; \$/km² de área deforestada

x_3 = km² de área deforestada /año

e_3 ; \$/diferencial de temperatura ambiente (°C)

x_2 = aumento de temperatura ambiente (°C)/año

9. Según el doctor cubano (Camaraza, 2019) es posible estimar el monto financiero del daño ambiental por dos componentes, estas son las emisiones de gases de efecto invernadero por combustión de combustibles fósiles y también por el consumo del agua potable, esto basado en informes de (Oficina nacional de estadísticas de Cuba, 2016), (Asdrubali F, 2015) y (Söshret Y, 2017). Según tales consideraciones propone:

Para el caso de Cuba:
 Por consumos de agua:

$$G_{Usoagua} = 0,145 \cdot e^{0,0596(W_R)} \quad (44)$$

Donde:

$G_{Usoagua}$; daño estimado anual por gastos de agua potable; \$/año

W_R ; es el consumo de agua anual; m³/año

Por emisiones de volúmenes de gases con efecto invernadero (CO₂, SO₂, CH₄, NO₂, NO_x y CO):

$$G_{Emis} = 3,911 \cdot A \cdot e^{0,226 \cdot B}$$

Donde:

$$A = Ln((CO_2)^{0,1} \cdot SO_2)^{0,1} + 0,252$$

$$B = Log \left[\frac{(CH_4 \cdot NO_x \cdot (CO)^{0,04} - (SO_2)^2)^2}{N_2O} \right]$$

(45, 46 y 47)

Donde:

Los volúmenes anuales de gases contaminantes son dados en Gg/año, mientras que G_{Emis} se obtiene en MMP/año. Los valores obtenidos con el empleo de la expresión para calcular G_{Emis} se sitúan en los intervalos recomendados (3,2–13,8) MUSD/Gg, de acuerdo al criterio de Asdrubali *et al.* y Stcöshret-Söugouht.

Resultados

Finalmente, a partir de los métodos descritos para estimar económicamente el daño ambiental por uso de combustibles fósiles se realizan cálculos con información obtenida de referencias tales como (Oficina nacional de estadísticas (ONEI). CUBA, 2018) y (Camaraza, 2019) siguiendo las metodologías de Veziroglu pero con datos actualizados para Cuba. Al respecto se pueden apreciar los datos procesados y los comportamientos de los indicadores para el período 2013-2018. Véase la tabla 4 y figuras 6, 7 y 8.

Tabla 4. Indicadores para estimación económica de daño ambiental. Fuente: elaboración propia.

Año	Gastos Inversión	Consumo de	Gasto daño	Intensidad energética (IE;	Prod. Int.Bruto-	Gasto daño
-----	------------------	------------	------------	----------------------------	------------------	------------

	protec. medio ambiente	combust. equiv.	amb/PIB	Consumo/PIB))	PIB	amb/GJ
	[MM\$]	[Mtcc]	[%]	[kg/\$]	[MM\$]	[\$/GJ.año]
2018	628.13	9332.68	0.628	0.093	100023	1.602
2017	642.55	9186.16	0.663	0.095	96851	1.665
2016	623.33	8701.81	0.682	0.10	91370.00	1.71
2015	534.82	10942.39	0.614	0.126	87133	1.164
2014	562.62	11209.57	0.698	0.139	80656	1.195
2013	517.27	11319.35	0.670	0.147	77148	1.088

A continuación las figuras 6, 7 y 8 de indicadores para estimación económica de daño ambiental.
Fuente: elaboración propia.

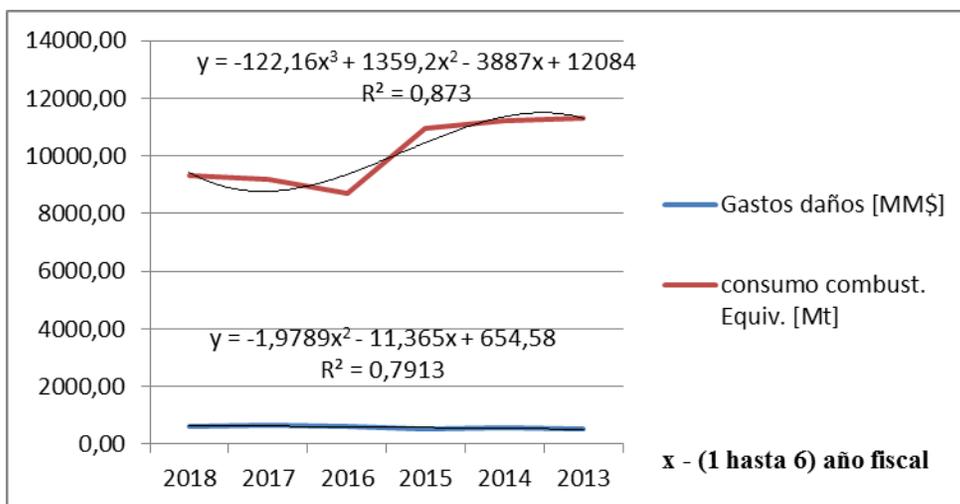


Figura 6. Fuente elaboración propia.

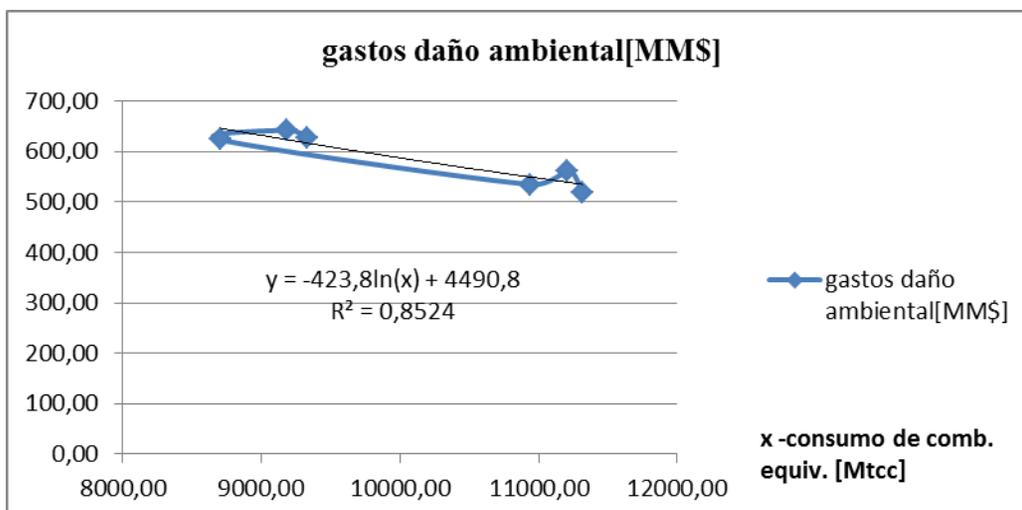


Figura 7. Fuente elaboración propia.

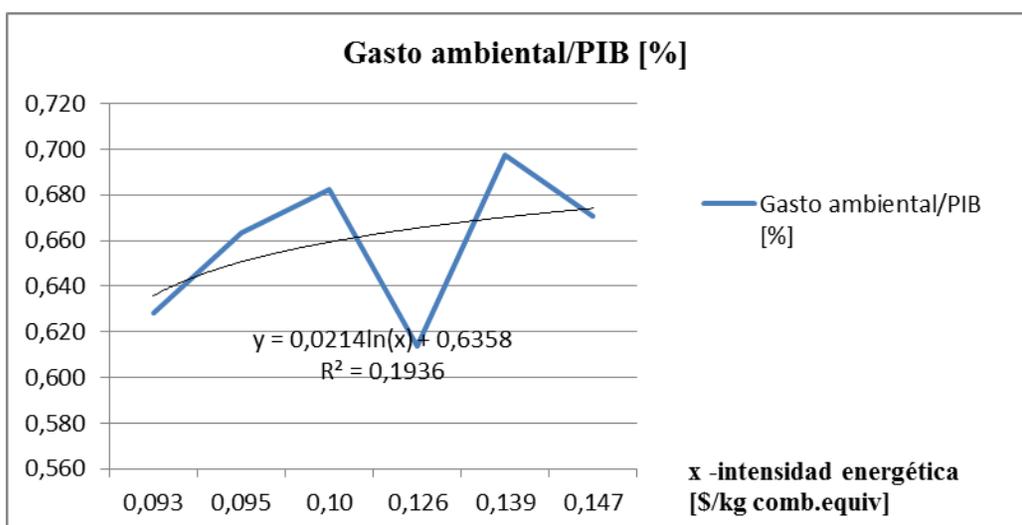


Figura 8. Fuente elaboración propia.

Al realizar los cálculos de daño ambiental estimado según los datos de la ONE de Cuba se aprecian variaciones entre los indicadores que tienen un significado físico esperado en su comportamiento funcional.

Por otra parte la magnitud de gastos para mejorar el medio ambiente solo tienen en cuenta los relativos a las inversiones, es decir no incluyen otros tipos de gastos, de ahí que los resultados que se alcancen sean inferiores a los esperados según la metodología de Veziroglu.

Conclusiones

Se han propuesto métodos para calcular la eficiencia termodinámica sostenible teniendo en consideración la presencia de diferentes tecnologías energéticas, a saber renovables,

convencionales y de máximo potencial. También se aplicó uno de los métodos para determinar la estimación económica del daño ambiental que provoca el uso de combustibles fósil, presentándose resultados para el caso de Cuba en el período 2013-2018 donde se aprecia que entre el (0,6-0,7) % del PIB se emplea en inversiones que reducen el daño ambiental que representan gastos entre (1,1-1,6)\$/GJ.año dados por los consumos de combustible. De incorporarse otras magnitudes de gastos financieros tales como los atribuibles a fenómenos climatológicos muy dañinos o los problemas de salud ocasionados, entonces los resultados obtenidos serían más elevados para la estimación económica calculada en este trabajo.

Referencias bibliográficas

ASDRUBALI F, B. G. *Comparative life Cycle assessment of an air-cooled condenser system and Conventional condensers. vol.15, 2015, pp. 10-15. 2015.*

BARBIR, F. *Enviromental Damage Due to Fossil Fuel Use. Vol. 15(# 10, pág. 739-749).1990.*

BEJAN, A. A. *Thermal Design and Optimization. Canada: JOHN WILEY & SONS, INC. 1996*

BRAVO, A. E. Metodología para valorar la sostenibilidad de la gestión de residuos agrícolas con fines energéticos. Cienfuegos: Universidad de Cienfuegos. 2019

CAMARAZA, M. Y. Tesis predefensa doctoral: Métodos para la determinación de los coeficientes de transferencia de calor en aerocondensadores que operan en centrales eléctricas de biomasa. Villaclara, Cuba: UCLV. 2019

CENGEL, C. T. *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences. USA: McGraw-Hill Education, Edic. 5ta. . 2017*

CENGEL, Y. A. Termodinámica (octava edición ed.). México, México: The McGraw-Hill Companies, Inc. 2014.

CONSEJO DE ESTADO DE LA REPÚBLICA DE CUBA. Decreto Ley 345 “Del desarrollo de las fuentes renovables y el uso eficiente de la energía”. Habana: Gaceta Oficial de la República de Cuba. 2019.

CUESTA, H. C. Los costes externos en los modelos energéticos globales de optimización. Una herramienta para la sostenibilidad. Universidad Rey Juan Carlos. España: Universidad Rey Juan Carlos. 2007.

GONZÁLEZ, M. J. PNCTI 05 Desarrollo energético Integral y Sostenible hasta el 2025. La Habana: Centro de Gestión de Información y Desarrollo de la Energía (CUBAENERGIA), (AENTA) del CITMA. 2020.

GRUPO NACIONAL DE ENERGÍA DEL MAR. Potencialidades de uso de la energía del mar en Cuba. Matanzas, Cuba: Universidad de Matanzas. 2010.

KWAK, C. U.-Y. (22 de marzo de 2020). Role of Waste Cost in Thermo-economic Analysis. Seoul. Korea: MDPI.

MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS DE CUBA. (5 de enero de 2019). anuario estadístico de Cuba 2018. Recuperado el 15 de abril de 2020, de <http://www.onei.cu>. 2019.

- MORAN MJ, S. H. Fundamentos de termodinámica. Madrid, España. 2000.
- MORAN, T. B. *Handbook of Thermal Engineering*. USA: CRC Press. 2da. Edic. 2018.
- OCAÑAS, G. V. Procedimiento para la valoración de la sostenibilidad energético. Santa Clara, Cuba: Universidad Central de Villaclara "Marta Abreu". 2006.
- OFICINA NACIONAL DE ESTADÍSTICAS (ONEI). CUBA. Series estadísticas 1998-2018. Medio Ambiente, Cuentas, consumo de energía. Recuperado el 10 de febrero de 2020, de <http://www.onei.cu>. 2018
- OFICINA NACIONAL DE ESTADÍSTICAS DE CUBA. (31 de 12 de 2016). anuario estadístico cubano. Recuperado el 15 de marzo de 2018, de www.onei.cu.
- OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (ONC). Sistemas de Gestión de la Energía. La Habana: Comité Técnico de Normalización NC/CTN 107. (ISO 50001:2011, IDT). 2011.
- POWERS, J. M. *Lecture Notes on Thermodynamics*. Francia: University of Notre Dame. 2017.
- QUN, & CHEN. *Entransy disipation-based thermal resistance method for heat exchanger performance desing and optimization. International Journal of heat and Mass Transfer, 156-162.2013.*
- RODRÍGUEZ, Á. R. Tesis de Maestría en Tecnología Energética: Diseño e implementación del sistema de monitoreo de la condición termodinámica de la instalación de turbina en la Central Termoeléctrica Antonio Guiteras. Matanzas, Cuba: Universidad de Matanzas. 2020.
- RUBIO, G. A. Combustión y Generadores de Vapor. Cienfuegos, Cuba: UNIVERSOSUR. 2007.
- SOLOMON HSIANG, P. O. *The Distribution of Environmental Damages*. Retrieved marzo 26, 2020, from google académico: www.academic.oup.com.n. 2019.
- SÖSHRET Y, S. H. Sustainability Assessment and improvement performance of a air-cooled condenser in power plant: Exergy-Based Method, in Energy solution to combat global warming. pp.1451. 2017.
- TOL, R. S. *Estimates of the Damage Costs of Climate Change. Environmental and Resource Economics 21: 135–160. 2002.*
- VALERO, A., et.al. *Structural Theory and Thermo-economic Diagnosis. Part I: On Malfunction and Disfunction Analysis. Proceeding of ECOS'99 Japan. 1999.*
- VEZIROGLU, T. *Environmental damage for energy use*. Coral Gables, FL, 1998.: Proceedings of the 12th WHEC, International Association for Hydrogen Energy. 1998

VIZCÓN, T. R. Tecnologías Energéticas Avanzadas. Curso de posgrado. Matanzas, Cuba: Universidad de Matanzas " Camilo Cienfuegos". 2013

VIZCÓN, T. R. "Energía y medio Ambiente". Curso de posgrado. Maestría de Producción más Limpia. Matanzas, Cuba: Universidad de Matanzas. 2018.