

UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
CENTRO DE ESTUDIO DE TERMOENERGÉTICA AZUCARERA (CEETA)



Procedimiento para la valoración de la sostenibilidad energético –
ambiental de estrategias energéticas.

Monografía

Autores: Dr. Víctor Samuel Ocaña Guevara
Dr. Candido Quintana Pérez
Dr. Jo Dewulf
Dr. Pablo Roque Díaz

Santa Clara
2008

Síntesis

En el presente trabajo se realiza la valoración de los factores que influyen sobre la sostenibilidad y en especial su componente energética, la cual constituye su eje central. Queda evidenciada la necesidad de contar con herramientas capaces de cuantificar el nivel de sostenibilidad energética de sistemas sociales. Por otro lado, la utilización de los recursos renovables disponibles, la limpieza de la energía consumida, la eficiencia de los sistemas de transformación energética y la capacidad de auto satisfacerse de energía constituyen los factores que influyen sobre la sostenibilidad energética, por estas razones es propuesto un procedimiento de cálculo mediante el cual puede determinarse el nivel de sostenibilidad energética.

El procedimiento propuesto tiene en cuenta los factores, anteriormente mencionados, agrupados de forma armónica en los indicadores de renovabilidad energética, de eficiencia de los sistemas de transformación (λ), de limpieza de la exergía consumida (β) y auto satisfacción exergética del sistema (γ), dando la posibilidad de evaluar la influencia de las fuentes de energía utilizadas, la eficiencia y el nivel de impacto sobre el medioambiente asociados a las tecnologías de transformación energéticas y la capacidad de auto sostenimiento energético sobre la sostenibilidad energética de un sistema dado. Estos indicadores son calculados sobre la base de los consumos y pérdidas, los que se transforman en unidades exergéticas para posibilitar su utilización más efectiva.

Cada uno de los indicadores propuestos permite focalizar los aspectos que influyen negativamente sobre la sostenibilidad energético ambiental del sistema, ejemplo de ello es el análisis del Indicador de Renovabilidad que al ser analizado por sectores, muestra que para Cuba la mayor fuente de exergía renovable que se consume proviene del portador bagazo, siendo el nivel de consumo del mismo proporcional al valor del indicador.

El sistema de indicadores anteriores constituye la base de cálculo para la determinación del Índice de Sostenibilidad Energético Ambiental (I_{SEA}), aplicado a la Provincia de Villa Clara, Cuba, para el año 2002, la República de Cuba para el año 2002 y un análisis temporal entre los años 1996 y 2004 del índice propuesto para Cuba.

Nomenclatura

Símbolo	Unidades	Significado
\bar{S}_T		Sostenibilidad total
\bar{S}_{ecol}		Sostenibilidad ecológica
\bar{S}_{econ}		Sostenibilidad económica
\bar{S}_{soc}		Sostenibilidad social
B_x^*	(J)	Costo exergético asociado al índice (x)
B_α^*	(J)	Costo exergético relacionado con el nivel de sostenibilidad
B_β^*	(J)	Costo exergético relacionado con la limpieza de la exergía consumida
B_γ^*	(J)	Costo exergético relacionado con la auto satisfacción exergética del sistema
B_T^*	(J)	Costo exergético total
B_λ^*	(J)	Costo exergético asociado al índice de eficiencia de la tecnología.
B_i	(J)	Exergía producida en la tecnología (i)
B_{tran}	(kJ)	Exergía consumida por los equipos de transporte.
B_{eb}	(kJ)	Exergía consumida por los equipos de bombeo.
B_{et}	(kJ)	Exergía perdida en la transmisión eléctrica.
ρ_{pt}	(kg/l)	Densidad del portador consumido para la transportación.
M_p	(t)	Cantidad de portador importado.
e_{pt}	(kJ/kg)	Exergía específica del portador consumido para la transportación.
I_c	(t/l)	Índice de consumo del portador consumido para la transportación.
η_{te}	Adimensional	Eficiencia de la transmisión eléctrica.
B_e	kWh	Consumo de energía eléctrica del sistema
B_o	(J)	Exergía almacenada en el sistema.
B_{imp}	(J)	Exergía importada al sistema
B_a^*	(PJ)	Costo exergético asociado al índice (a)
B_T^*	(PJ)	Costo exergético total
B_{te}	(PJ)	Exergía consumida por los equipos de transporte
B_{eb}	(PJ)	Exergía consumida por los equipos de bombeo
B_{et}	(PJ)	exergía perdida en la transmisión eléctrica
σ_α	Adimensional	Coefficiente de peso correspondiente al nivel de renovabilidad de la exergía consumida en el sistema, adimensional
σ_β	Adimensional	Coefficiente de peso correspondiente a la limpieza de la exergía consumida, adimensional
σ_γ	Adimensional	Coefficiente de peso correspondiente a la auto satisfacción exergética del sistema, adimensional

σ_λ	Adimensional	Coefficiente de peso correspondiente a la eficiencia de los sistema de transformación energética, adimensional
\dot{m}_k	(kg).	Cantidad de contaminante (k) emitido
ϕ_k	Adimensional	Factor de daño ambiental.
B_{Res}	(PJ).	Reserva de exergía en el sistema
Bc_{exp}	(PJ)	Exergía exportada del sistema
$Bc_{con(s,p)}$	(PJ)	Exergía consumida en el sistema
Be_{exp}	(PJ)	Exergía de la electricidad exportada del sistema
$Bc_{con(s,p)}$	(PJ)	Exergía de la electricidad consumida en el sistema
Ab_k	(kg)	Cantidad del poluente (k) que resulta removido de los desechos de la tecnología (i) cuando utiliza el potador (p).
AN	\$	Anualidad generación de electricidad comprada por el sector (s)
B_{Ab}^*	(PJ)	Costo exergético de Abatimiento de las sustancias contaminantes, en
B_{fi}^*	(J)	Exergía física del poluente.
B_{qui}^*	(J)	Exergía química del poluente.
Bc	(PJ)	Demanda de exergía de portadores combustibles.
Bccom	(PJ)	Exergía de portadores combustibles no utilizados para generar electricidad
Bcpro	(PJ)	Exergía de portadores combustibles no utilizados para la generación de electricidad producida por el sector (s)
Be	kWh	Demanda de exergía eléctrica
Becom,	(PJ)	Exergía eléctrica comprada por el sector (s)
Bepro	(PJ)	Exergía eléctrica producida por el sector (s)
Bex	(PJ)	Exergía vendida por el sector (s)
B_i	(J)	Exergía producida en la tecnología (i).
$B_{i,p}$	(J)	Exergía producida por la tecnología (i) utilizando el portador (p) que es consumida en el sistema.
B_{nr}	(J)	Exergía consumida en el sistema proveniente de la tecnología de transformación (i) que utiliza portadores no renovables.
B_{prop}	(PJ)	Exergía obtenida a partir de recursos extraídos del propio sistema.
Br	(J)	Exergía consumida proveniente de la tecnología de transformación (i) que utiliza portadores renovables.
B_{rc}	(J)	Exergía renovable consumida
B_{rd}	(J)	Exergía renovable disponible
B_T	(J)	Exergía total producida en la tecnología (i).
B_t	(J)	Exergía total consumida en el sistema analizado.
c	Adimensional	Consumidor
Ctax	(\$/t)	Tasa de carbono vigente
e_c	(kJ/kg)	Exergía específica del portador utilizado
e_p	(kJ/kg)	Exergía específica del portador de energía primaria (p) en
e_s	(kJ/kg)	Exergía específica del portador d energía secundaria (p) en
f	Adimensional	Tipo de tarifa según consumidor (c)
Fu	Adimensional	Factor de utilización de la tecnología (i)
G_i	(kg/kWh)	Consumo específico de combustible t, tiempo en el cual se realiza el análisis.
i	Adimensional	Tipo de tecnología
In	Adimensional	Tasa de interés vigente
j	Adimensional	Tarifa de venta
p	Adimensional	Tipo de portador.
PR	Adimensional	Período de recuperación simple de la inversión.
s		Fracción de masa del azufre
TIR	Adimensional	Tasa interna de retorno.
T_o		Temperatura del ambiente de referencia

T_v	h	tiempo de vida útil de la tecnología (i)
U_i	(u)	número de unidades de la tecnología (i)
VAN	Adimensional	Valor actual neto.
W_k	(kg)	es la cantidad del poluyente (k) producto de la transformación del portador energético (p)
W_p	t/t	Factor de emisión
x_i		Fracción de cada uno de los gases componentes.
Z_{in}	\$/kW	Costo de instalación, llave en mano, de la tecnología (i)
Z_k	(\$/kg)	Tasa de impuesto por la emisión del contaminante (k) por la transformación del portador energético (p)
ZOM	\$/kW	Costo de operación y mantenimiento
Z_p	(\$/kg).	Costo del portador (p) utilizado en la conversión
Z_p	\$/t	Costo del portador (p)
Z_{tarC}	\$/kJ	Tarifa de compra de los portadores combustibles
Z_{tarE}	\$/kWh	Tarifa de compra de energía eléctrica
Z_{tarV}	\$/kWh	Tarifa eléctrica
ZV	\$/t	Costo de venta del portador (p)
α	Adimensional	Indicador de renovabilidad de la exergía consumida
β	Adimensional	Indicador de limpieza de la exergía consumida
γ	Adimensional	Indicador de auto satisfacción exergética
η	Adimensional	Eficiencia de transformación de primera ley de la tecnología (i)
λ	Adimensional	Indicador de eficiencia exergética de la transformación
τ_{op}	(h/año)	Tiempo de operación anual de la tecnología (i)
$\Psi_{(i)}$	Adimensional	Eficiencia exergética de la tecnología (i), adimensional.
$\Psi_{(i)}$	Adimensional	Eficiencia exergética de la tecnología (i)

Índice

AGRADECIMIENTOS	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
SÍNTESIS	II
NOMENCLATURA	III
ÍNDICE	VI
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.	X
INTRODUCCIÓN	1
<u>CAPÍTULO 1: SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA, UN PASO HACIA EL DESARROLLO SOSTENIBLE. ESTADO DEL ARTE.</u>	6
1.1 DESARROLLO SOSTENIBLE. ASPECTOS FUNDAMENTALES.	6
1.1.1 DESARROLLO SOSTENIBLE. CONCEPTOS.	6
1.1.2 DIMENSIONES DE LA SOSTENIBILIDAD Y EL DESARROLLO SOSTENIBLE.	10
1.1.3 HERRAMIENTAS PARA LA CUANTIFICACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD.	11
1.1.3.1 Indicadores de sostenibilidad débil.	12
1.1.3.2 Indicadores de sostenibilidad fuerte	13
1.2 RELACIÓN ENTRE LA TERMODINÁMICA, LA ENERGÍA Y LA ECONOMÍA.	17
1.3 LA EXERGÍA, HERRAMIENTA POTENCIAL EN LOS ANÁLISIS DE LA SOSTENIBILIDAD.	21
1.3.1 EXERGÍA Y CONCEPTO DE CALIDAD DE LA ENERGÍA.	22
1.3.2 EXERGÍA COMO CONCEPTO GENERAL DEL RECURSO.	22
1.3.3 EXERGÍA, ASPECTOS ECONÓMICOS.	23
1.3.4 EXERGÍA Y MEDIOAMBIENTE.	24

Índice

1.3.4.1	Exergía, emisiones contaminantes.	25
1.3.5	EXERGÍA Y DESARROLLO SOSTENIBLE.	26
1.3.6	USO DE LOS ANÁLISIS EXERGÉTICOS EN TRABAJOS ANTERIORES.	27
1.3.6.1	Exergía como índice.	27
1.3.6.2	La exergía, su relación con la economía.	28
1.3.6.3	Utilización de los análisis exergéticos para la definición de políticas energéticas.	29
1.3.6.4	Uso del análisis exergético para el estudio del comportamiento del consumo en sociedades.	30
1.3.6.5	La exergía y las energías renovables.	33
1.4	CONCLUSIONES PARCIALES:	36
<u>CAPÍTULO 2. PROCEDIMIENTO PARA ALCANZAR LA SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA.</u>		<u>37</u>
2.1	INTRODUCCIÓN.	37
2.2	CONSIDERACIONES PARA EL DESARROLLO DE LOS PROCEDIMIENTOS PROPUESTOS.	37
2.3	FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA.	38
2.3.1	RENOVABILIDAD DE LA ENERGÍA CONSUMIDA EN LOS SISTEMAS.	39
2.3.2	INDICADOR DE LIMPIEZA DE LA EXERGÍA UTILIZADA EN LOS SISTEMAS DE TRANSFORMACIÓN QUE PROVEEN DE EXERGÍA AL SISTEMA.	41
2.3.3	INDICADOR DE AUTO SATISFACCIÓN DE LA DEMANDA DE EXERGÍA DEL SISTEMA.	44
2.3.4	CÁLCULO DEL INDICADOR DE EFICIENCIA EXERGÉTICA DE LOS SISTEMAS DE TRANSFORMACIÓN QUE PROVEEN DE EXERGÍA AL SISTEMA.	45
2.4	ÍNDICE DE SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICO AMBIENTAL.	47
2.4.1	COEFICIENTES PESO.	49
2.4.2	COSTO EXERGÉTICO ASOCIADO AL INDICADOR DE RENOVABILIDAD DE LA EXERGÍA CONSUMIDA.	50
2.4.3	COSTO EXERGÉTICO ASOCIADO AL INDICADOR DE EFICIENCIA DE LA TECNOLOGÍA.	51
2.4.4	COSTO EXERGÉTICO ASOCIADO AL INDICADOR DE LIMPIEZA DE LA ENERGÍA CONSUMIDA.	52
2.4.4.1	Cálculo del costo exergético de abatimiento (B_{Ab}).	53
2.4.4.2	Cálculo del costo exergético asociado a los impactos ambientales (B_k)	54
2.4.5	COSTO EXERGÉTICO ASOCIADO AL INDICADOR DE AUTO SATISFACCIÓN DEL CONSUMO DE EXERGÍA EN EL SISTEMA.	56
2.5	FORMULACIÓN DEL AMBIENTE DE REFERENCIA (AR).	58
2.6	CONCLUSIONES PARCIALES.	60

CAPÍTULO 3. APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PROPUESTO. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

61

3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS UTILIZADOS DURANTE LA APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PROPUESTO. 61

3.2 ANÁLISIS DE LAS FUENTES DE DATOS UTILIZADAS PARA LA APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PROPUESTO. 63

3.2.1 FUENTE DE DATOS RELACIONADOS CON LAS PROPIEDADES FÍSICO – QUÍMICAS DE LOS COMBUSTIBLE. 63

3.2.2 FUENTE DE DATOS RELACIONADOS CON LOS FACTORES DE EMISIÓN DE CONTAMINANTES. 64

3.2.3 FUENTE DE DATOS RELACIONADOS CON LOS FLUJOS DE PORTADORES ENERGÉTICOS. 64

3.2.4 FUENTE DE DATOS RELACIONADOS CON LOS COSTOS EXERGÉTICOS ASOCIADOS CON LOS INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD. 67

3.3 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE ENERGÉTICO AMBIENTAL. 70

3.3.1 APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LA SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICO AMBIENTAL PARA EL CASO DE LA PROVINCIA DE VILLA CLARA EN EL AÑO 2002 71

3.3.2 APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LA SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICO AMBIENTAL PARA EL CASO DE LA REPÚBLICA DE CUBA EN EL AÑO 2002. 72

3.3.3 ANÁLISIS TEMPORAL DEL PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LA SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICO AMBIENTAL PARA EL CASO DE LA REPÚBLICA DE CUBA ENTRE LOS AÑOS COMPRENDIDOS ENTRE 1996 Y 2002. 76

3.4 CONSIDERACIONES PARA DEFINIR UNA MATRIZ ENERGÉTICA. 86

CONCLUSIONES. 94

RECOMENDACIONES. 96

BIBLIOGRAFÍA. 97

ANEXO 1. TABLAS DE CÁLCULOS Y RESULTADOS ASOCIADOS A LA APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PROPUESTO AL CASO DE LA PROVINCIA DE VILLA CLARA PARA EL AÑO 2002. 105

ANEXO 2. TABLAS DE CÁLCULOS Y RESULTADOS ASOCIADOS A LA APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PROPUESTO AL CASO DE LA REPÚBLICA DE CUBA PARA EL AÑO 2002 107

Índice de tablas

TABLA 2. 1. ESPECIES ESTABLES EN EL MEDIO AMBIENTE.	58
TABLA 2. 2. RELACIÓN SUSTANCIA – ELEMENTO QUÍMICO.	59
TABLA 3. 1. COSTO DEL DAÑO AMBIENTAL POR CONTAMINANTE (€/T)	68
TABLA 3. 2. VALOR ELEGIDO PARA EL COSTO DEL DAÑO AMBIENTAL POR CONTAMINANTE (€/T).	69
TABLA 3. 3. PRECIOS DE LOS COMBUSTIBLES	69
TABLA 3. 4. COMPORTAMIENTO DE LOS INDICADORES PROPUESTOS POR SECTOR DE LA ECONOMÍA DE VILLA CLARA EN EL AÑO 2002.	71
TABLA 3. 5. RESULTADOS CALCULADOS DE LOS INDICADORES PROPUESTOS PARA LA ECONOMÍA DE LA PROVINCIA DE VILLA CLARA EN EL AÑO 2002.	71
TABLA 3. 6. COSTO EXERGÉTICO ASOCIADO A CADA INDICADOR PARA LA PROVINCIA DE VILLA CLARA EN EL AÑO 2002.	72
TABLA 3. 7. VALORES DE A POR SECTOR DE LA ECONOMÍA CUBANA PARA EL AÑO 2002	73
TABLA 3. 8. DATOS GENERALES DE LAS TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN CUBA PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA. (OFICINA NACIONAL DE ESTADÍSTICAS. REPÚBLICA DE CUBA., 2002)	75
TABLA 3. 9. COSTOS ENERGÉTICOS RELACIONADOS CON LOS INDICADORES PROPUESTOS.	75
TABLA 3. 10. COMPORTAMIENTO DEL INDICADOR A POR SECTOR Y AÑO.	77
TABLA 3. 11. COMPORTAMIENTO DEL INDICADOR A POR AÑO.	78
TABLA 3. 12. COMPORTAMIENTO DEL INDICADOR B POR SECTOR Y AÑO.	79
TABLA 3. 13. COMPORTAMIENTO POR AÑO DE B.	80
TABLA 3. 14. COMPORTAMIENTO DEL INDICADOR Γ POR SECTOR DE LA ECONOMÍA Y AÑO.	80
TABLA 3. 15. COMPORTAMIENTO ANUAL DEL INDICADOR Γ .	82
TABLA 3. 16. ANÁLISIS ANUAL DEL INDICADOR Λ .	83
TABLA 3. 17 COSTOS EXERGÉTICOS CALCULADOS PARA CADA INDICADOR Y AÑO.	84
TABLA 3. 18. RESULTADOS DEL ÍNDICE DE SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICO AMBIENTAL (ISEA) PARA CADA AÑO ANALIZADO.	85

Índice de figuras.

FIG. 0. 1. CONSUMO MUNDIAL DE PETRÓLEO. DATOS TOMADOS DE BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY JUNIO 2006 (BEYOND PETROLEUM, 2006).	1
FIG. 0. 2. INCREMENTOS ANUALES DE LAS RESERVAS PROBADAS DE PETRÓLEO EN MILES DE MILLONES DE TONELADAS. DATOS TOMADOS DE BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY JUNIO 2006 (BEYOND PETROLEUM, 2006)	2
FIG. 3. 1. ADAPTACIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO ENERGÉTICO PARA EL CASO DEL SISTEMA CUBA.(OCAÑA, 2006B)	62
FIG. 3. 2. COMPORTAMIENTO DE LOS INDICADORES PROPUESTOS POR SECTOR DE LA ECONOMÍA DE VILLA CLARA EN EL AÑO 2002.	71
FIG. 3. 3. COMPORTAMIENTO DE ALPHA EN LOS SECTORES DE LA ECONOMÍA CUBANA EN EL 2002.	73
FIG. 3. 4. COMPORTAMIENTO DE B POR SECTORES DE LA ECONOMÍA CUBANA EN EL 2002.	73
FIG. 3. 5. COMPORTAMIENTO DE Γ POR SECTORES DE LA ECONOMÍA CUBANA EN EL 2002.	74
FIG. 3. 6. VALORES DE LOS INDICADORES CALCULADOS. PARA CUBA EN EL AÑO 2002.	76
FIG. 3. 7. COMPORTAMIENTO DEL INDICADOR A POR SECTOR Y AÑO.	77
FIG. 3. 8. COMPORTAMIENTO DE LA PRODUCCIÓN Y CONSUMO DE BAGAZO DE CAÑA.	78
FIG. 3. 9. COMPORTAMIENTO DEL INDICADOR A POR AÑO.	78
FIG. 3. 10. COMPORTAMIENTO DEL INDICADOR B POR SECTOR Y AÑO.	79
FIG. 3. 11. COMPORTAMIENTO POR AÑO DE B.	80
FIG. 3. 12. COMPORTAMIENTO DEL INDICADOR Γ POR SECTOR Y AÑO.	81
FIG. 3. 13. COMPORTAMIENTO POR AÑO DE B.	82
FIG. 3. 14. PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO POR AÑO EN CUBA ENTRE 1996 Y 2004.	83
FIG. 3. 15. CONSUMO TOTAL DE EXERGÍA EN CUBA.	83
FIG. 3. 16. COMPORTAMIENTO POR AÑO DEL INDICADOR Λ .	83
FIG. 3. 17. ANÁLISIS DE LOS CUATRO INDICADORES POR AÑO.	84
FIG. 3. 18 ÍNDICE DE SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICO AMBIENTAL (ISEA) PARA CADA AÑO ANALIZADO.	85

Introducción

En los últimos 50 años la humanidad ha degradado más el planeta que en los 100 siglos anteriores (Turrini, 1999). El aumento del consumo de recursos naturales, la contaminación generada en los procesos de transformación, el cambio climático y la pérdida de biodiversidad influye negativamente en el futuro del planeta. Según la «Evaluación de los Ecosistemas del Milenio», el que ha sido considerado «el estudio más exhaustivo elaborado hasta la fecha sobre el estado del planeta» (Ayres, 1998), el 60 por ciento de los servicios de los ecosistemas que hacen posible la vida en la Tierra está siendo degradado o utilizado de manera no sostenible, es decir se atenta contra su capacidad de renovación.

Sin duda, de todos los consumos de la sociedad humana, el más preocupante resulta el incremento del consumo de energía. Como muestra la Figura 1, existe una marcada tendencia al aumento del consumo de petróleo, unido a la estabilización de los incrementos de las reservas probadas, Figura 2, puede concluirse que dentro de poco más de 50 años el petróleo será historia.

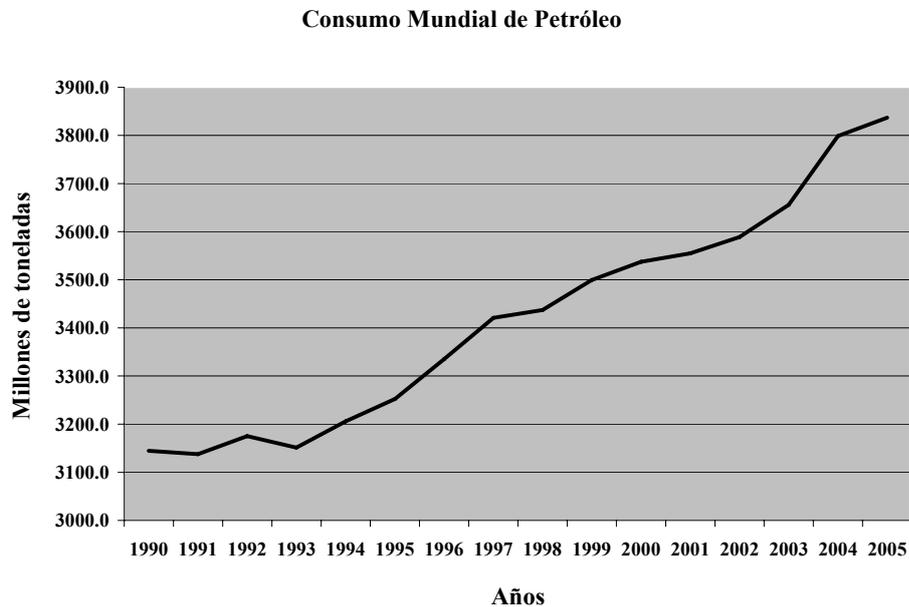


Fig. 0. 1. Consumo Mundial de Petróleo. Datos tomados de BP Statistical Review of World Energy Junio 2006 (Beyond Petroleum, 2006).

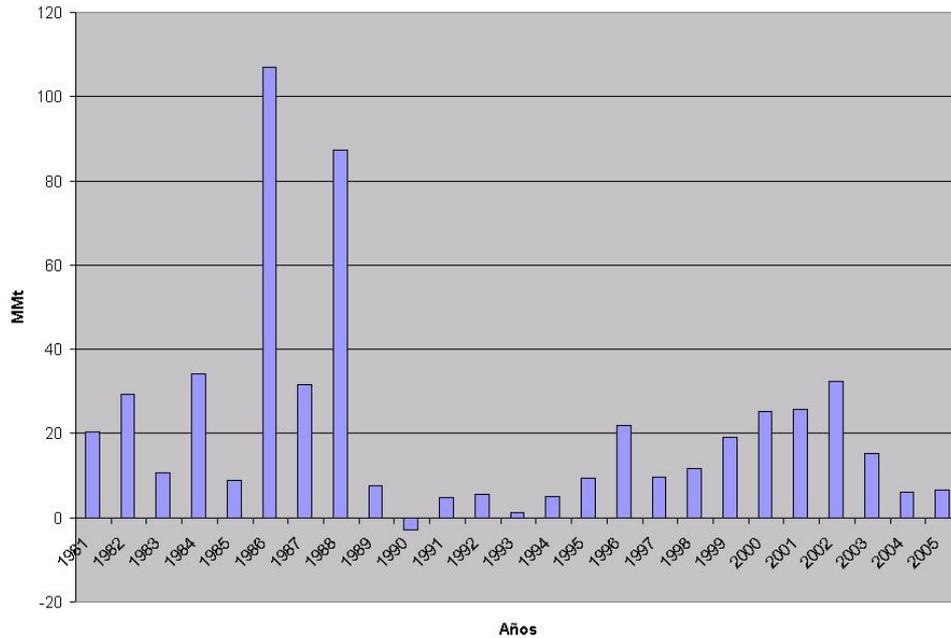


Fig. 0. 2. Incrementos anuales de las reservas probadas de petróleo en miles de millones de toneladas. Datos tomados de BP Statistical Review of World Energy Junio 2006 (Beyond Petroleum, 2006)

Debido a la estructura tecnológica establecida el agotamiento del petróleo, traería una crisis energética internacional sin precedente. Si el modelo vigente de consumo de energía no es cambiado y no hay compromisos firmes en favor de las fuentes limpias, se llegará al punto donde revertir los efectos sea imposible. La conferencia de Kyoto ha marcado un camino, pero la realidad, resulta bien distinta caminando justamente en sentido contrario a donde se quiere ir.

Algunos escenarios de desarrollo apuntados por la Agencia Internacional de Energía (IEA, siglas en inglés) muestran que con nuevas políticas, un incremento de la eficiencia energética y un mayor uso de las fuentes renovables, el crecimiento de las emisiones puede frenarse significativamente en los países desarrollados, hasta reducirlas hacia el 2030 (IEA Greenhouse R&D Programme, 1994).

Pero cualquier cambio en el modelo energético necesita una transición, para que ésta se logre es necesario disponer de una cantidad de tiempo el que no es suficiente debido al peligro que representa para el orden biológico conocido, la actitud depredadora que cada día es promovida por los paradigmas de estilos de vida establecidos.

Kofi Annan, Secretario General de la ONU, dijo: “Nuestro mayor desafío en este nuevo siglo es tomar una idea que parece abstracta - el desarrollo sustentable - y convertirla en una realidad diaria por todas

Introducción

las personas del mundo”(Annan, 2002). Muchas son las definiciones y aportes que han aparecido desde que en el año 1987 la Comisión Bruntland planteara su ya famosa propuesta de conceptualización sobre lo que debía ser el Desarrollo Sostenible (World Commission on Environment and Development, 1987).

Se han reconocido hasta la fecha más de 200 definiciones desde diferentes puntos de vista científico, que van desde las ciencias ambientales, hasta las naturales y exactas, pasando por las ciencias técnicas y la sociología, entre otras, han realizado importantes contribuciones al conocimiento y difusión universales de la Sostenibilidad.

Son generalmente aceptados los criterios de que la Sostenibilidad global tiene varios componentes que pueden ser agrupados en tres vectores, a saber: la sostenibilidad ambiental, la sostenibilidad económica y la sostenibilidad social (Elkington, 1997, Jiménez, 2000).

Por otra parte, desde el punto de vista de las ciencias técnicas es bien conocido el criterio de que lo que no se mide no puede ser controlado. Este concepto de valor práctico para la toma de decisiones se ha convertido en una verdadera inquietud científica, ya que se adolece de procedimientos prácticos lo suficientemente completos que permitan la proyección de políticas encaminadas al logro de la sostenibilidad.

Como ya se ha comentado, la energía constituye el centro de la actividad humana, por lo que el logro de la sostenibilidad energética por parte de un sistema social será el primer paso para el logro de la sostenibilidad total.

Lamentablemente, la no existencia de procedimientos lo suficientemente completos y encaminados directamente al logro de la sostenibilidad energética que permitan evaluarla en el tiempo y realizar comparaciones entre sistemas, resulta un impedimento para el logro de ésta.

Algunos científicos han encaminado sus esfuerzos a desarrollar instrumentos metodológicos que permitan determinar mediante un valor numérico la calidad ambiental de una determinada zona de estudio, como paso inicial hacia la determinación de la calidad de vida o, incluso, la sostenibilidad.

En este sentido es importante el trabajo que han realizado un grupo de especialistas de algunas universidades de Europa y América Latina en el marco del Proyecto de colaboración internacional INCO- ELANEM A Euro Latin American Network on Environmental Assessment and Monitoring (ELANEM INCO Project: ERBICI18-CT98-0290), los cuales han desarrollado una metodología basada en la aplicación de un conjunto de indicadores e índices para la determinación de la Calidad Ambiental

Introducción

(EQ). Estos fueron agrupados en: indicadores de presión, indicadores de estado e indicadores de respuesta, mientras que los índices determinados fueron: Grado de Naturalidad y otros referidos a las funciones del medio, teniéndose así un índice de fuente de recursos, otro de sumidero y un tercero de soporte de actividades, todos los cuales son finalmente integrados en el ya referido EQ. La validación de la metodología propuesta se realizó en 10 zonas de estudio de Europa y América Latina (Cendrero, 2003, Ocaña, 2002a).

Sin embargo, la metodología ELANEM no tiene en cuenta en toda su magnitud la problemática energética, considerada por muchos como el problema estratégico número uno de la temática ambiental, o incluso de la humanidad (Ocaña, 2002b, Villegas, 2004).

Otros relevantes esfuerzos se han desarrollado para establecer metodologías de análisis de la problemática energética a partir del estudio de la segunda ley de la termodinámica, tomando en consideración que el problema principal está dado por la degradación de la energía y no por su pérdida, lo cual no ocurre según establece la primera ley. Por esta razón la comunidad científica ha dado un paso hacia delante incluyendo los análisis de segunda ley (Ocaña, 2006a).

La propiedad termodinámica que caracteriza la calidad de la energía es la exergía y en los últimos años se dedican grandes esfuerzos científicos a la vinculación de los análisis exergéticos a los problemas globales y ambientales de los procesos asociados a las pérdidas y costos energéticos para poder interpretar de manera adecuada muchos fenómenos y procesos que ocurren en industrias, zonas de estudio determinadas, a nivel de países o a nivel planetario. Como principales actores de estos esfuerzos pueden citarse (Cornelissen, 1997), (Georgescu-Roegen, 1975), (Dewulf, 2000).

En el caso de Cuba han sido dados algunos pasos en este sentido, Roque P. y Wall publicaron su trabajo “National exergy balance of Cuba: Pointing Towards a Time Sustainable Development” (Roque, 2003.) en el que es realizado por primera vez un balance exergético de la República de Cuba.

Como se puede apreciar existe dispersión en los esfuerzos por alcanzar la sostenibilidad y en especial la Sostenibilidad Energética por lo que se detecta el siguiente problema científico.

Problema Científico:

Debido a la dispersión en los esfuerzos por alcanzar la sostenibilidad y en especial la sostenibilidad Energético – Ambiental, no ha sido encontrada una herramienta lo suficientemente completa que

Introducción

permita cuantificar el nivel de sostenibilidad energética de un sistema dado; destacando los aspectos sobre los que se debiera actuar para mejorar su estado.

Hipótesis:

Es posible modelar un procedimiento matemático que permita cuantificar el nivel de sostenibilidad energético - ambiental de sistemas, definiendo las áreas o subsistemas que intervienen negativamente sobre su estado de sostenibilidad. Permitiendo además la selección de una matriz energética adecuada en relación con la sostenibilidad energética.

Objetivo general:

Desarrollar un procedimiento que permita cuantificar la sostenibilidad energético – ambiental para sistemas dados, mediante la integración de los análisis exergéticos y de sistemas de indicadores, permitiendo la comparación espacio-temporal con otros sistemas, para alcanzar la sostenibilidad energético ambiental en dichos sistemas.

Objetivos específicos:

Determinar los factores que influyen sobre la sostenibilidad energético-ambiental de un sistema cualquiera, a partir del estudio evolutivo de los conceptos sobre desarrollo sostenible y los caminos propuestos con anterioridad para alcanzarlo.

Establecer un procedimiento que permita cuantificar el nivel de sostenibilidad energético-ambiental de diferentes sistemas y la comparación espacio - temporal de los mismos.

Aplicar el procedimiento desarrollado en diferentes sistemas de estudio, para comprobar su efectividad, en la caracterización de la sostenibilidad energético ambiental.

Capítulo 1: Sostenibilidad Energética, un paso hacia el Desarrollo sostenible. Estado del Arte.

1.1 Desarrollo sostenible. Aspectos fundamentales.

La mayoría de los científicos y una parte de los políticos actuales, reconocen que el futuro de la humanidad es incierto, por esta causa el concepto de “Desarrollo Sostenible”, dadas las presentes condiciones, se ha convertido en una esperanza salvadora para la humanidad. Resulta necesario dejar claro sus basamentos y aspiraciones para que se convierta de una agradable utopía en una realidad cotidiana, por esta razón en el presente capítulo se analizan los aspectos fundamentales que se relacionan con dicha forma de desarrollo.

1.1.1 Desarrollo Sostenible. Conceptos.

En los últimos 50 años, la población global ha consumido más bienes y servicios que la integración de todo el consumo de las generaciones anteriores. Este crecimiento en el consumo ha sostenido el crecimiento económico, la degradación medioambiental y mejora del nivel de vida, en algunos casos. Sin embargo, los modelos del consumo difieren significativamente entre las naciones desarrolladas y en vías de desarrollo.

Pasada la primera mitad del siglo XX, debido a las grandes transformaciones económicas, tecnológicas y geopolíticas fueron modificadas las relaciones entre el sistema humano y el medio ambiente. Estas condiciones comenzaron a preocupar a la comunidad científica internacional, siendo valoradas las consecuencias de ese modo de comportamiento. Desde la conferencia de Estocolmo 1972 sobre Medio Ambiente y Desarrollo, momento en que fue reconocida oficialmente la crisis ambiental contemporánea, hasta la conferencia de Río de 1992 sobre Medio Ambiente y Desarrollo (ambas organizadas por Naciones Unidas), se pudo observar un progresivo acercamiento a la comprensión de la separación entre desarrollo y medio ambiente.

Capítulo 1: Sostenibilidad Energética, un paso hacia el Desarrollo sostenible. Estado del Arte.

Sin lugar a dudas, el Término *Desarrollo Sostenible* resulta en extremo popular en la actualidad, es usado tanto por políticos como por científicos en aras de los más disímiles propósitos. Unos lo ven como la utopía inalcanzable para la raza humana, por su propia condición egoísta y de auto satisfacción, sin que importen el resto de los individuos que le rodean.

Este término se refiere a lograr el desarrollo económico y social de manera que no agote los recursos naturales de un ambiente dado, promoviendo su conservación. Existen más de 200 definiciones y aplicaciones específicas del término sostenibilidad y desarrollo sustentable, el más conocido es el planteado por la Comisión Mundial de Ambiente y Desarrollo (World Commission on Environment and Development, 1987, CNUMAD, 1992). Esta comisión estableció que "el desarrollo sustentable es un proceso de cambio en que la explotación de recursos, la dirección de inversiones, la orientación de desarrollo tecnológico y el cambio institucional, es hecho consecuentemente con el futuro, así como las necesidades presentes". Según esta Comisión, el desarrollo sostenible es aquel "que satisface las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades". Se considera también como el mantenimiento del delicado equilibrio entre la necesidad humana de mejorar los estilos de vida conservando los recursos naturales y ecosistemas de los cuales depende la existencia futura del hombre. El desarrollo sustentable implica el crecimiento económico junto con la protección de la calidad medioambiental, cada uno refuerza al otro. El ser de este concepto de desarrollo es una relación estable entre las actividades humanas y el mundo natural que no disminuyen las perspectivas para las generaciones futuras de disfrutar, por lo menos, una calidad de vida tan buena como la actual. Esta idea encierra dos aspectos fundamentales, el primero, **Las Necesidades** las que cada sociedad según sus patrones culturales y aspiraciones se plantea y el segundo **Las Limitaciones** que imponen los recursos del medio ambiente, el estado actual de la tecnología, la organización social y la capacidad de la biosfera de asimilar los efectos de las actividades del hombre.

La humanidad no debe tomar más de la naturaleza que lo que la propia naturaleza puede restituir. Esto significa que se adopten estilos de vida y caminos de desarrollo que respeten y trabajen dentro de los límites de la naturaleza. Puede hacerse sin rechazar el gran beneficio que la tecnología moderna ha traído, con tal de que la tecnología también trabaje dentro de esos límites.

El desarrollo sustentable respeta la capacidad limitada de un ecosistema de absorber el impacto de actividades humanas, incluyendo la preservación del ambiente para otras especies, así como para las personas. En el sentido más amplio, sostenibilidad se refiere a la capacidad de un sistema socio-

Capítulo 1: Sostenibilidad Energética, un paso hacia el Desarrollo sostenible. Estado del Arte.

ecológico de persistir intacto en el futuro. La sostenibilidad medioambiental se refiere al mantenimiento del ecosistema y la base del recurso natural siendo la degradación medioambiental un fracaso (Raskin, 1997). Bajo esta consideración, la degradación toma tres formas: la disminución de los recursos la contaminación o sobre uso de la capacidad de absorción de desechos del ambiente y la reducción en la biodiversidad o pérdida de algunos tipos de recursos.

La Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CNUMAD, 1992) tuvo en cuenta este modelo de desarrollo y trató de precisarlo mediante una serie de principios en los cuales se planteó el protagonismo de los seres humanos en relación con la sostenibilidad, teniendo el derecho a una vida saludable y productiva en armonía con la naturaleza; el derecho a desarrollarse debe ejercerse en forma responsable teniendo en cuenta las necesidades de las generaciones presentes y futuras; con el propósito de alcanzar el desarrollo sostenible, la protección del medio ambiente debe constituir una parte integrante del proceso de desarrollo, no considerándose en forma aislada; los Estados deberían reducir y eliminar las modalidades de producción y consumo insostenibles y fomentar políticas demográficas adecuadas y la cooperación entre Estados en cuanto al conocimientos científicos y tecnológicos e intensificando el desarrollo.

Luego de varios años de reuniones y discusiones oficiales internacionales, todavía es difícil establecer un significado concreto del concepto de desarrollo sostenible. Muchos son los que de una manera u otra han establecido sus ideas, como ya se ha planteado. Sin embargo, existen reglas para el comportamiento humano teniendo en cuenta la sostenibilidad, ejemplo de ello es lo expresado por Hawken “deja al mundo mejor que como lo encontraste, no cojas más de lo que necesites, intenta no dañar la vida o la naturaleza, compensa lo que haces” (Hawken, 1993).

Como puede apreciarse no existe consenso en cuanto al concepto de desarrollo sustentable, cómo medirlo e incluso, en cómo debe promoverse. Martínez Alier agrupa la discusión en dos puntos de vista: por un lado, el de los ecólogos que asocian la sostenibilidad con la preservación del estado y función de sistemas ecológicos. Por otro lado, los economistas que consideran que la sostenibilidad está relacionada con el mantenimiento y mejora del estándar de vida humana (Martínez, 1998). En las palabras de Robert Solow “si la sostenibilidad es algo más que un eslogan o expresión de emociones, debe equivaler a un orden que tienda a conservar la capacidad productiva para un futuro indefinido” (Solow, 1992). Ahora, mientras en la vista de los ecólogos los recursos naturales tienen un valor que va más allá de su uso productivo y no pueden ser sustituidos por otras formas de capital, dentro del punto de vista de la

Capítulo 1: Sostenibilidad Energética, un paso hacia el Desarrollo sostenible. Estado del Arte.

economía pueden consumirse los recursos naturales y sustituirlos por otras formas de capital, con tal de que la capacidad productiva se mantenga, contraponiéndose a la idea ecologista.

Según Jiménez Herrero un acercamiento para reunir los puntos de vistas de economistas y ecólogos es asumir que los individuos deducen el bienestar y las preferencias del consumo, la calidad medioambiental y la salud social, pudiendo así decidir la sustitución perfecta. En este caso, es acertado postular la existencia de una función de bienestar social que incorpora indicadores de consumo, calidad medioambiental y estabilidad social. Entonces, un camino de desarrollo sustentable puede definirse como el que aumenta al máximo el valor presente de la función social intertemporal (Jiménez, 1992). En otros términos, un juego dado de indicadores económicos, medioambientales y sociales se agregaría en un solo indicador que se transforma en una medida universal de la sostenibilidad.

Podrían entonces evaluarse las políticas con respecto a los impactos que ellas llevan sobre el indicador. Un ejemplo de este tipo de indicador es el Índice de Desarrollo Humano (United Nations Development Program, 1991). Este indicador integra el promedio de esperanza de vida, alfabetización e ingreso per cápita, publicado anualmente en el Informe de Desarrollo Humano. El HDI se usa a menudo por los gobiernos nacionales y las organizaciones internacionales para fijar las metas de la política y asignar los recursos públicos (United Nations Development Program, 2005). Desafortunadamente, en este indicador se obvian una serie de aspectos que la humanidad puede considerar importantes, uno de ellos es la dimensión medioambiental la cual no es tomada en cuenta y, por el contrario agredida hasta cierto punto, ya que la misma estimula el consumo por parte de las sociedades. Otro aspecto es la aceleración de la disminución de las reservas de recursos, especialmente los energéticos no renovables, lo que disminuye su disponibilidad en el tiempo.

Por consiguiente, proponer una función social que agregue las preferencias sociales puede ser una tarea imposible. La existencia de una función social depende de fuertes asunciones con respecto a las preferencias de las personas y los formularios funcionales que en la mayoría de los casos no existen. Pero, ¿cómo se hará para medir sus componentes? Naciones Unidas ha realizado estudios utilizando la Web para analizar las preferencias con vista a establecer los pesos sobre cada una de las dimensiones tenidas en cuenta (el crecimiento económico, la calidad ambiental y la distribución de los ingresos). Los resultados pusieron en evidencia la alta variación de los criterios.

Frecuentemente es confundido el término crecimiento económico con el de desarrollo. Para muchos resulta un error: "No es correcta la relación consecutiva entre crecimiento y desarrollo, más incorrecta

Capítulo 1: Sostenibilidad Energética, un paso hacia el Desarrollo sostenible. Estado del Arte.

aún es la creencia de que crecimiento engendra el desarrollo, sobre todo porque el contenido de esas palabras no es, sino 800 millones de seres víctimas de la pobreza absoluta" (Perroux, 1984).

De todo lo anterior, se concluye que el desarrollo sostenible es aquel que respeta la condición y capacidad limitada del sistema que resulta analizado, busca la satisfacción de las necesidades sociales presentes sin llegar a agotar las fuentes de recursos imprescindibles para suplir las necesidades en un futuro indefinido, aprovechando al máximo los recursos y disminuyendo la emisión de Sustancias contaminantes, que de una forma o de otra, limiten la regeneración del propio recurso o de algún otro.

Es necesario que se valoren algunos aspectos importantes sobre la sostenibilidad

1.1.2 Dimensiones de la sostenibilidad y el desarrollo sostenible.

En la actualidad el concepto de desarrollo sostenible resulta un conjunto de interrelaciones entre sistemas (naturales y sociales), dinámica de procesos (energía, materia e información) y escala de valores (valores, ética). En la medida en que los sistemas económicos, ecológicos y sociales interaccionan entre sí de forma independiente, su estabilidad dependerá de su capacidad del conjunto y garantizará sus funciones básicas. Teniendo en cuenta lo anterior Jiménez Herrero planteó que el desarrollo sostenible presenta una serie de dimensiones las se muestran a continuación (Jiménez, 2000):

Sistema ecológico, como soporte básico de la vida y de las actividades humanas.

Sistema económico, como conjunto productivo de bienes y servicios materiales.

Sistema social, como base de la organización de los agentes sociales e institucionales.

Sistema de valores, complementando los anteriores, se podrá hablar de una cuarta dimensión ética que envuelve a las otras tres y que proporciona un nuevo conjunto de ideas y de valores humanos respecto a la naturaleza (ética del ecosistema global).

Lo anterior puede ser expresado matemáticamente de la siguiente forma vectorial (Jiménez, 2000),

$$\vec{S}_T = \vec{S}_{ecol} + \vec{S}_{econ} + \vec{S}_{soc}$$

Donde la sostenibilidad total (\vec{S}_T) es la resultante de los vectores correspondientes a la sostenibilidad ecológica (\vec{S}_{ecol}), la sostenibilidad económica (\vec{S}_{econ}) y a la sostenibilidad social (\vec{S}_{soc}).

Capítulo 1: Sostenibilidad Energética, un paso hacia el Desarrollo sostenible. Estado del Arte.

Tratar de expresar la noción de sostenibilidad en forma vectorial es un intento de visualizar y precisar su esencia como proceso de equilibrio dinámico en el tiempo. Aunque el tema energético no se encuentra expresado explícitamente, implícitamente entrelaza las dimensiones planteadas por Jiménez Herrero. La energía constituye el centro de la actividad humana, como es mostrado en la figura 1.1 por lo que su sostenibilidad será decisiva para el logro de la sostenibilidad global (Ocaña, 2006b).

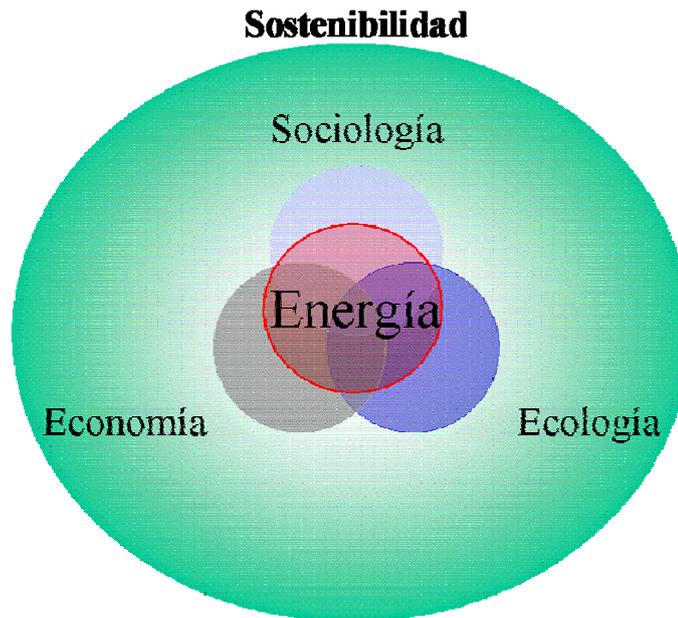


Figura 1. 1. Dimensiones de la sostenibilidad (Ocaña, 2006b)

1.1.3 Herramientas para la cuantificación de la sostenibilidad.

Al plantearse todos estos conceptos, resulta necesario discutir las herramientas que han sido desarrolladas, para lograr la obtención de un desarrollo en armonía con el medio que sustenta a la sociedad humana. Una de estas herramientas ha sido el uso de indicadores con el propósito de tener un acercamiento a la medida del nivel de sostenibilidad de un sistema, dichos indicadores se dividen en base a criterios de sostenibilidad débil y de sostenibilidad fuerte reportada por Jiménez Herrero (Jiménez, 2000).

Indicadores de sostenibilidad débil	Indicadores de sostenibilidad fuerte
PNB. Producto Nacional Bruto	Indicadores de eficiencia económica y ecológica.
PNB Verde. Producto Nacional Bruto Verde	Indicadores de equilibrio ambiental
Indicador de sostenibilidad económica (ISE), para una economía cerrada (Ahorro genuino)	Indicadores de balances materiales y energético termodinámicos
	Índice de Calidad Ambiental (ELANEM)
	Huella ecológica

1.1.3.1 Indicadores de sostenibilidad débil.

Estos tipos de indicadores promueven una actitud optimista respecto a la situación ambiental defendiendo la sustitución del capital natural por otras formas de capital, dando un enfoque tecnocéntrico (Jiménez, 2000). Algunas posiciones menos radicales plantean una conservación moderada de los recursos naturales ya que reconocen cierto valor al no uso de la naturaleza e introducen los principios de la termodinámica en los análisis económicos (Georgescu-Roegen, 1971).

En el caso del PNB, se mide el nivel de vida de la población a partir del consumo. Si bien este indicador muestra el crecimiento de la economía de un país o una región se encuentra muy lejos de ser capaz de dar una idea de la sostenibilidad del desarrollo ni de la calidad de vida de la población. Al tener en cuenta algunos aspectos ambientales este índice se convierte en el PNB- Verde, acercándose un poco al objetivo pero dejando fuera otros aspectos igualmente importantes.

El indicador (ISE) se centra en la capacidad de una economía de sustentarse a sí misma, teniendo en cuenta el ahorro genuino de los recursos naturales utilizados para satisfacer la demanda de la sociedad.

1.1.3.2 Indicadores de sostenibilidad fuerte

Estos tipos de indicadores muestran una visión pesimista (neomalthusiano) llevando a un conservacionismo radical (Jiménez, 2000). Mantienen un enfoque egocéntrico o biocéntrico (Daly, 1973), siendo el ecosistema global quien limita al sistema económico.

En el espíritu de la sostenibilidad fuerte se toma como base, el mantenimiento del capital natural para que el subsistema económico acople sus mecanismos internos a los flujos, tanto de entrada como de salida de los bienes y servicios que produce.

1.1.3.2.1 Indicadores de eficiencia económica y ecológica.

En estos indicadores se toma como regla la minimización de los flujos procesados por el sistema económico maximizando y los servicios producidos, por otro lado tienen en cuenta que en una economía abierta es importante considerar los costos que supone sacrificar determinados servicios necesarios del ecosistema perdidos debido a la reducción del capital natural al transformarlo en capital artificial o manufacturado (Daly, 1991, Daly, 1996).

Sobre esta base es establecido un indicador básico de eficiencia de servicios económico-ecológicos, el cual fue propuesto por Daly, 1991 como un indicador de eficiencia de utilización de la naturaleza para satisfacer las necesidades humanas, estas dependen de dos factores: la cantidad de servicios obtenidos por unidad de capital manufacturado y la cantidad de servicios sacrificados por unidad de capital natural, que se pierde como resultado de su conversión en capital manufacturado.

1.1.3.2.2 Indicadores de equilibrio ambiental

La gestión integrada de los recursos naturales y los residuos atendiendo a los efectos sobre el capital natural y la calidad ambiental sugiere una fórmula de sostenibilidad generalizando, un nivel mínimo de equilibrio ambiental medido en términos físicos, con independencia de cualquier objetivo de eficiencia económica. Este modelo de desarrollo sostenible elaborado por Barbieri y Markandya en 1990, parte de la existencia de un valor de activos ambientales mínimo sobre cuya base la tasa de degradación del

Capítulo 1: Sostenibilidad Energética, un paso hacia el Desarrollo sostenible. Estado del Arte.

medio ambiente, entendida como sostenibilidad material, se define como una función dependiente del equilibrio entre los flujos de residuos, los flujos de asimilación de éstos por el medio ambiente, así como de los flujos de recursos naturales renovables, de flujos de producción biológica y los flujos de recursos no renovables (Jiménez, 2000).

La condición estricta para que no exista una degradación ambiental en un tiempo cumple los principios operativos del desarrollo sostenible en términos de equilibrios entre las tasas de uso de los recursos naturales renovables y no renovables y las tasas de emisión y absorción de contaminantes. Para este caso no existen valores fijos para cada variable contemplada. En realidad, el deterioro ambiental se deriva de la sobreexplotación de los recursos y de la sobrecarga de los ecosistemas, una vez que se sobrepasan determinados <umbrales críticos>> difíciles de precisar.

1.1.3.2.3 Indicadores materiales y energéticos-termodinámicos.

Los impactos de las actividades económicas sobre el medio ambiente y los procesos de transformación de capital natural en artificial, deben ser analizados mediante criterios basados en balances de materiales y energía, integrados posteriormente a otros criterios que tengan en cuenta las preferencias individuales y sociales (Jiménez, 2000).

En la actualidad, las teorías del *Análisis Energético* y de la *Economía Termodinámica* planteadas por Georgescu-Roegen, en los años setenta, han sido encausadas hacia la corriente actual de la *economía ecológica*, los aportes de la termodinámica constituyen un importante recurso para la obtención de indicadores que pueden orientarse en la corriente de sostenibilidad fuerte. Las pérdidas en los procesos de transformación, conjuntamente con la tendencia a la explotación prioritaria de los recursos de mayor calidad permiten una mayor utilización de nuevos recursos materiales y energéticos a medida que aumentan las necesidades o se van explotando recursos de menor calidad (Georgescu-Roegen, 1971). Este proceso puede medirse en términos de eficiencia en el uso de materiales y energía. De acuerdo con ello, han sido definidos dos indicadores básicos reportados por Ayres y retomados por Jiménez Herrero (Ayres, 1978, Jiménez, 1992):

Capítulo 1: Sostenibilidad Energética, un paso hacia el Desarrollo sostenible. Estado del Arte.

1. Eficiencia de materiales (Em) como relación entre los recursos materiales necesarios para satisfacer la demanda final (RDF) y los recursos totales procesados (RTP): $Em = RDF/RTP$.

2. Eficiencia energética (Ee) definida por la relación entre los flujos energéticos aportados al consumo final (EDF) y los recursos energéticos totales procesados ETP : $Ee = EDF/ETP$.

Al analizar el desarrollo humano, cuya base se encuentra en procesos económicos de extracción de recursos, su transformación y generación de residuos, queda manifiesto su relación con las leyes de la termodinámica. Como quiera que la entropía no tiene una forma de medición precisa, la evaluación de los procesos que implican uso de recursos, energía y generación de residuos, reclaman algún tipo de medida útil relacionada con el devenir entrópico del desarrollo humano.

Algunas teorías recientes sobre <<termoeconomía>> señalan indicadores precisos en el sentido apuntado. Como el concepto de energía, en general, es ambiguo, se trata de utilizar indicadores que midan el rendimiento de los procesos, las pérdidas y las ganancias en términos de energía neta o energía útil (Jiménez, 2000).

El concepto de *exergía* aparece como un instrumento eficaz para definir el trabajo potencial que se puede extraer de un sistema por procesos reversibles según el sistema se equilibra con el entorno. Las particularidades de la *exergía* son, tal como señala Ayres en (Ayres, 1995), una forma natural de medir las entradas de recursos, las salidas de residuos y las pérdidas de un sistema económico, teniendo en cuenta condiciones de cantidad y calidad, siendo aplicable a flujos de materia y de energía. Además, la *exergía* no se conserva y realmente se consume en el proceso económico. Por tanto, es un factor que se puede considerar tan básico como el capital o el trabajo en la función de producción (Ayres, 1998).

La termodinámica ha realizado varios aportes al campo de los indicadores, los que resultan especialmente interesantes debido a que pueden expresarse en unidades medibles, aunque no siempre con el nivel de precisión deseadas para cualquier proceso (Jiménez, 2000):

1. *Evaluación de entalpía*, como medida de la variación de un sistema entre un estado inicial y otro final.

Capítulo 1: Sostenibilidad Energética, un paso hacia el Desarrollo sostenible. Estado del Arte.

2. *Evaluación de exergía*, que considera las propiedades cualitativas de la energía según la capacidad de un sistema para producir trabajo mecánico. El indicador del *Excedente Exergético* es una medida del rendimiento energético del sistema económico.

3. *Evaluación de eMergía*, que permite establecer las formas energéticas en base a la incorporación de la energía solar y medir la calidad de la energía en los sistemas económico-ecológicos y sus interfases (Pilliet, 1987, Odum, 1983). El indicador del *Excedente eMergético* es una medida de la capacidad de reproducción de los recursos naturales.

4. *Evaluación entrópica*, que define la degradación irreversible de la energía (segundo principio de la termodinámica) y se puede utilizar para medir el grado de contaminación agregado. El indicador de *Generación de Entropía Mínima* es una medida de la minimización de la contaminación.

1.1.3.2.4 La Huella Ecológica como indicador de sostenibilidad.

El término Huella Ecológica fue definido por Wachernagel y Rees en 1996 como el “área de territorio ecológicamente productiva, cultivos, pastos, bosques y ecosistemas marinos, en que son producidos los recursos necesarios y es capaz de asimilar los residuos de su población durante un tiempo indefinido, donde quiera que se encuentre esa área” (Wackernagel, 1996). Otra definición se estableció por Georg Borgstrom 1967 “es el territorio fantasma externo al país, necesario para mantener a la población dentro de los límites de su área” (Borgstrom, 1967).

Este indicador persigue simplificar e integrar en un número fácil de manejar, el uso que cada comunidad hace de los sistemas naturales con el propósito de mantener sus formas de vida. Este análisis otorga al territorio la importancia que la capacidad de carga da a la población, es decir, en vez de buscar cuánta población se puede mantener busca cuánta superficie de suelo productivo se necesita para sustentar una población determinada sin importar la ubicación de este suelo (Salas, 2003).

Para el cálculo de la huella ecológica es necesario contar con los datos de los recursos utilizados y los desechos generados, teniendo en cuenta que no existe deterioro, contaminación o pérdida de la capacidad productiva en los sistemas naturales durante los procesos de producción. Para la conversión son utilizados tres procedimientos (Salas, 2003):

Posibilidad de obtener metanol, partiendo de ciertos productos agrícolas en un año

Posibilidad de obtener biomasa para combustión

Superficie arbolada necesaria para asimilar el CO₂ emitido a la atmósfera

Este indicador aunque tiene en cuenta los aspectos relacionados con el consumo y sus límites, solo muestra el estado de los sistemas analizados, no permite definir los cambios concretos en los que se tendría que trabajar para mejorar el estado del mismo.

1.2 Relación entre la termodinámica, la energía y la economía.

A mediados del siglo XVIII nació en Francia la escuela económica de los fisiócratas, la cual tenía como primer principio que los recursos naturales y en particular la agricultura y la tierra, eran la fuente del bienestar material (Cleveland, 1996). Son conocidos generalmente como la primera escuela científica organizada de economía y sostenían que el proceso económico podía ser entendido basándose en un factor muy simple, la productividad de la agricultura. Es de señalar que ni los fisiócratas, ni Smith, ni Maltus ni Ricardo, se ocuparon del tema del uso de la energía en la economía (Martínez, 1992).

Fue Carnot, en 1824 quien escribió su memoria sobre la eficiencia de las máquinas de vapor y posteriormente, Clausius dio a las dos leyes su formulación clásica, con las que se formaliza el nacimiento de la termodinámica. Podolinski intentó medir la relación entre la energía utilizada y la energía obtenida en la agricultura. Los planteamientos de Podolinsky aseguraban que para que la humanidad alcanzara las condiciones de existencia, cada caloría de trabajo humano debía tener una productividad de por los menos 10 calorías. La productividad del trabajo humano tendría que ser igual o mayor que el coeficiente económico; al no ocurrir, aparecería la escasez y, muchas veces, podría producirse una reducción de la población. El análisis de flujo de energía llevado a cabo por Podolinsky fue posteriormente utilizado por algunos autores como (Cottrell, 1955, Odum, 1971, Pimentel, 1974, Cleveland, 1984).

Podolinsky establece un punto muy importante al lograr obtener, en ese proceso energético, la mayor cantidad posible de energía transformable en trabajo económico (trabajo mecánico) (Podolinsky, 1995). Esta concepción se apoya íntegramente en la segunda ley de la termodinámica, para señalar la tendencia del universo a un equilibrio térmico en donde, por no existir diferencias en el calor, no será posible realizar trabajo y para indicar que desde que aparecieron los seres vivos, principalmente las plantas, ha aumentado la cantidad de energía disponible sobre la tierra.

Capítulo 1: Sostenibilidad Energética, un paso hacia el Desarrollo sostenible. Estado del Arte.

Ya en el siglo pasado Soddy, aplicó las leyes de la termodinámica al proceso económico, enfatizando que es la energía solar la que potencia todos los procesos de la vida, definió la riqueza como un flujo que no podía ahorrarse sino sólo gastarse, esta riqueza real tenía su origen en el flujo de energía solar que se consume en cuanto llega a la tierra y ésta no podía ser realmente acumulada (Soddy, 1926). Aunque parte de esa riqueza era transformada en los bienes de capital, este capital no podía almacenarse porque estaba sujeto a un continuo decrecimiento, ya que en términos físicos, era una energía incorporada en ciertos objetos y sujeta a la 2^{da} ley de la termodinámica.

Por otro lado, Soddy en 1995 replantea el aspecto de la energía acumulada (fósil), que se degrada y “genera riqueza”, según la economía convencional. También llama la atención sobre la imposibilidad lógica desde la termodinámica, de degradar un flujo energético considerando que se ha aumentado la riqueza física., parte de reconocer que la energía es la fuente fundamental del bienestar entendido, como la disponibilidad de los adelantos tecnológicos(Soddy, 1995).

En 1955 Cottrell en su análisis denominado “Energía y Sociedad” enfatizaba en dos aspectos de las relaciones entre la calidad de la energía y el desarrollo económico y social (Cottrell, 1955). El primero lo denominó “ganancia energética” que es la diferencia entre la energía liberada por un proceso y la energía invertida en él y el segundo aspecto fue la relación entre la cantidad de energía utilizada para subsidiar el trabajo humano y la productividad. En dicho trabajo, planteó que la Revolución Industrial fue exitosa porque el trabajo humano fue complementado por enormes cantidades de energía provenientes de los combustibles fósiles.

Más adelante, Boulding plantea que la tierra resulta un sistema económico cerrado en el que la economía y el medio ambiente no se caracterizan por relaciones lineales sino por relaciones circulares, pero no hizo referencias a la imposibilidad de reciclar el 100 % de los recursos.

Nicolas Georgescu Roegen fue quien dio relevancia económica a la segunda ley, afirmando que se pueden reciclar algunos desechos generados por la economía, pero la energía no se puede reciclar, se usan flujos energéticos de baja entropía y se desechan los mismos flujos pero en condiciones de muy alta entropía o baja disponibilidad (Georgescu-Roegen, 1971). Dicho autor en los años 70, a raíz de la crisis de los precios del petróleo, publicó su artículo “The Entropy Law and the Economic Process” en el que se presenta su idea de la existencia de un vacío en la teoría económica convencional la que genera una confusión entre los conceptos de stocks (reservas) y flujos, dando lugar a una relación equivocada entre capital natural y capital manufacturado. Enfatizó que la materia está sometida a una disipación

Capítulo 1: Sostenibilidad Energética, un paso hacia el Desarrollo sostenible. Estado del Arte.

irrevocable, lo cual es verdad para los sistemas cerrados. Todos los cambios en el estado de los materiales estarán acompañados de una degradación de la calidad de la energía y finalmente, el sistema alcanzará un estado en el cual no existirán gradientes de temperatura, presión o composición que le permitan un nuevo cambio de estado.

Basado en las afirmaciones anteriores y otras observaciones más, Georgescu Roegen postuló la que denominó la cuarta ley de la termodinámica, ley de entropía de la materia, describiendo la degradación de la materia como el factor que finalmente impone las Restricciones al crecimiento económico, por encima de la disponibilidad de energía. Esta postulación del cuarto principio de la termodinámica, le valió varias críticas, y de alguna forma debilitó la relevancia de todo su trabajo relacionado con el segundo principio y los procesos económicos (Constanza, 1997).

En la década del 70, H. T. Odum realizó dos de las más importantes contribuciones a la economía ecológica. La primera es el concepto de calidad de la energía y la segunda es el flujo en contracorriente entre la energía y el dinero, que se da en la economía (Odum, 1971). Este autor en su teoría energética del valor, afirma que la energía es la fuente de valor económico, argumenta que en cualquier lugar de la economía en el cual fluye un dólar, se requiere un flujo de energía en dirección opuesta. Además propone el término "energía" para realizar la contabilidad energética y lo define como el trabajo hecho previamente para obtener un producto o un servicio, esta es una medida de la energía usada en el pasado, una "memoria de la energía". Según Odum, existen tipos de energías diferentes para cada tipo de energía disponible.

En 1977, Daly publica "La Economía en Estado Estacionario", donde presenta la inconsistencia física entre el crecimiento económico, la protección de los recursos y el medio ambiente. En este tipo de economía, el stock de riqueza física (capital) y la población se mantienen constantes (Daly, 1977). Daly en 1985 argumenta que el modelo económico basado en un flujo circular de intercambio de valor es incompleto, porque no toma en cuenta el flujo de recursos naturales de baja entropía a partir de los cuales se derivan todos los bienes y servicios y con el cual está acoplado (Daly, 1985).

Constanza, R. retoma la propuesta de Odum en 1971 y usa el término "energía incorporada" para describir el costo energético total de un bien o un servicio y, a continuación usando evidencias empíricas, propone su teoría energética del valor en la cual sostiene que el valor de cualquier bien o servicio está en últimas instancias relacionado con la cantidad de energía usada, directa o indirectamente, en su producción (Constanza, 1980).

Capítulo 1: Sostenibilidad Energética, un paso hacia el Desarrollo sostenible. Estado del Arte.

En 1983, Chapman y Roberts publican su libro “Metal Resources and Energy”, en el que hacen un extenso tratado de la relación entre la abundancia de los recursos y la energía necesaria para obtenerlos, los modelos para la predicción del agotamiento de recursos no renovables, los límites termodinámicos en la explotación de los metales y los efectos del reciclado en la disponibilidad de materiales. Adicionalmente, presentan datos de consumo de energía asociados a las diferentes operaciones minerales (extracción y concentración) y en el refinado de diferentes metales, a partir de las menas concentradas (Chapman, 1983).

Durante los años 90 han existido varias propuestas interesantes que relacionan las teorías de la termodinámica y la sostenibilidad, entre ellas se encuentran la de Ayres y Martínás en 1995 y la de Ayres en 1996, los cuales proponen la exergía como una medida agregada del flujo de recursos naturales, así como de los desechos generados por el subsistema económico, ya que es una función que se puede calcular, tanto para los recursos energéticos como no energéticos (Ayres, 1995, Ayres, 1996).

A partir de los trabajos realizados por Szargut en 1988 (Szargut, 1988), quien como se verá más adelante, definió un ambiente de referencia que permite calcular la exergía química para cualquier sustancia, a partir de datos físicos y químicos, Ayres propone hacer una contabilidad exergética a lo largo del ciclo de vida de los procesos y productos (Ayres, 1998), hallando la exergía utilizada y la pérdida como una medida de la eficiencia técnica, eficiencia con la cual es convertida la exergía contenida en los recursos naturales, en servicios finales.

Una de las críticas a éste análisis se ha hecho por Cleveland en 1998, según este trabajo, la exergía al igual que la entalpía, no debe ser usada para realizar una contabilidad de materiales y energía porque es unidimensional, por otro lado la exergía no necesariamente refleja otros atributos de un combustible que lo hacen útil para la economía. Agrega, que en el caso de los materiales, la exergía no puede explicar, por ejemplo la resistencia al impacto, la resistencia a la corrosión, ductilidad y otras propiedades que determinan su utilidad (Cleveland, 1998). Lo que si puede medir la exergía, entendida como la cantidad mínima de trabajo que es necesario invertir para, a través de un proceso reversible, obtener una sustancia o recurso a partir de un ambiente de referencia, es la mínima energía que tuvo que invertir la naturaleza para entregar los recursos naturales en las condiciones específicas (físicas y químicas) que los diferencian del entorno y los hacen útiles para el subsistema económico.

Entre los trabajos más recientes, vale la pena destacar los de Naredo y Valero en 1999 y Ranz en 1999 los que plantean las bases para una teoría general del costo físico de los procesos económicos, el

desarrollo de la teoría del costo exergético y el cálculo del "costo exergético de reposición de los recursos minerales" la que contribuye a llenar un poco el vacío existente en la valoración objetiva del capital natural (Naredo, 1999, Ranz, 1999). Valero ha defendido la aplicación de la filosofía termo-económica en el análisis operacional y diagnóstico de sistemas energéticos. Esta es una herramienta que permite estudios más completos de estos sistemas, realizando un mejor uso de los recursos energéticos disponibles (Valero, 2004).

1.3 La exergía, herramienta potencial en los análisis de la sostenibilidad.

La energía es el elemento central de las interacciones entre la naturaleza y la sociedad. Es también considerada vital para el desarrollo económico. Por otro lado no existe fuente de energía que sea completamente neutral con respecto al ambiente. Bajo estas circunstancias, la energía tiene una naturaleza interdisciplinaria, influyendo sobre el desarrollo sustentable y el impacto medioambiental. De aquí debe considerarse que todas las políticas en materia de energía deben ser auténticas, teniendo en cuenta las condiciones globales, es decir, adaptando los sistemas energéticos reconociendo la fuerte unión que existe entre los requisitos de los sistemas energéticos y las emisiones contaminantes.

Bejan en 1982 estudió la aplicación de los principios de minimización de la producción de entropía para formular aspectos de política energética introducidos primeramente por Bejan M. y Bejan A., donde señaló que esa minimización de generación de entropía debe ser considerada un "diseño filosófico" para sistemas térmicos y su concepto puede ser empleado en desarrollar una consecuente y comprensiva política energética a largo plazo (Bejan, 1982). Tal política energética debe proveer una gestión eficiente de la energía contabilizando la exergía total o suministro de todos los combustibles conocidos y fuentes de energía (Bejan, 1994). De esta manera se resalta el papel de la exergía como una herramienta primaria para dar legitimidad a la política energética a largo plazo.

El impacto sobre el ambiente y el logro del aumento de la utilización eficiente de los recursos energéticos, es mejor dirigido considerando la exergía, la que resulta una medida de su utilidad, calidad o potencial para causar el cambio. El último punto sugiere que la exergía pueda ser o proporcionar, la base para una medida efectiva del potencial de una sustancia o forma de energía para impactar el ambiente. La necesidad de entender la unión entre la exergía y energía y el impacto medioambiental, aumenta el interés en esta herramienta.

1.3.1 Exergía y Concepto de Calidad de la Energía.

La Exergía es el 'combustible' para los sistemas disipativos, es decir, sistemas que se sostienen transformando energía y materiales. El concepto de exergía se ha usado principalmente dentro de la tecnología de producción de calor y potencia, donde se trabaja con calores de calidad variable. El campo de aplicación puede ser extendido a la conversión de la totalidad de energía y materiales en la sociedad, permitiendo una descripción uniforme del uso de recursos físicos y los impactos medioambientales en relación con su uso (Wall, 1993); lo cual permite, realizar modelos predictivos que organicen los sistemas de transformación de la energía, con vista a aumentar el aprovechamiento de los recursos no renovables y los renovables.

Los recursos naturales son tradicionalmente divididos en energéticos y no energéticos. El concepto de exergía es igualmente una medida adecuada del recurso. La exergía contenida en los recursos energéticos puede ser valorada por su contenido energético multiplicado por un factor de calidad, que se aplica a la forma de energía en cuestión.

1.3.2 Exergía como concepto general del recurso.

Los recursos naturales, como la energía y materias primas, aparecen como flujos o como reservas. Estos necesitan mucho tiempo para su formación. La disponibilidad del recurso, estará en función de la velocidad de generación del mismo (Wall, 1997).

Al analizar el uso del recurso físico en las sociedades usando el concepto de exergía, la ineficiencia y el derrochante uso de los recursos quedarán expuestos totalmente. Esto, a su vez, mostrará las posibles mejoras tecnológicas que deben implementarse y las emisiones que deben ser reducidas.

La exergía de una sustancia se encuentra formada por la exergía vinculada a la formación de la misma, la exergía asociada a la capacidad para reaccionar o provocar cambio y la exergía relacionada con la diferencia entre el estado de la sustancia y su estado muerto. La integración de estos valores permitirá poseer una medida de la sustancia en unidades exergéticas.

La valoración exergética de los recursos permite establecer criterios de manejo de los mismos, ya que expresa la magnitud del consumo físico de dichos recursos, aunque no puede expresar propiedades como la viscosidad, temperatura de vaporización o temperatura de auto inflamación, si muestra el trabajo

mecánico que es posible utilizar de dicho recurso. Estando además limitado por las características de los sistemas que transforman

1.3.3 Exergía, aspectos económicos.

La exergía también es un concepto útil en la economía. En la macroeconomía, ofrece una manera de evaluar la disminución de los recursos y la destrucción medioambiental por medio de un impuesto exergético. En la microeconomía, se ha combinado perfectamente con el análisis costo-beneficio para mejorar el diseño. Diseñar sistemas eficientes y con costo efectivo que también tengan en cuenta las condiciones medioambientales, resulta uno de los desafíos importantes que los ingenieros enfrentan. En el mundo, con recursos naturales finitos y grandes demandas de energía, se incrementa la importancia de entender los mecanismos de degradación energética y de los recursos, desarrollando acercamientos sistemáticos para mejorar los sistemas y así también para reducir el impacto ambiental. La Exergía combinada con la economía, representa una poderosa herramienta para el estudio sistemático y la optimización de sistemas. Varios autores trabajan en los aspectos de la termoeconomía de sistemas energéticos y citan a Georgescu-Roegen con su trabajo (Georgescu-Roegen, 1971) como el padre de la termoeconomía, dándole un papel de pionero en esta dirección. La exergía y la microeconomía forman la base de la termoeconomía que también se nombra exergoeconomía (Bejan, 1996). El concepto de utilidad es un concepto central en la macroeconomía, ella también se relaciona estrechamente a la exergía y un impuesto exergético es ejemplo de cómo pudiera introducirse la exergía en la macroeconomía.

Wall en 1993 señaló que el concepto de exergía no sólo es crucial para los estudios de eficiencia, sino también para la contabilidad de costos y análisis económico (Wall, 1993). Usando la exergía contenida como una base para la contabilidad del costo, es importante dar valor a los productos para la evaluación de las ganancias. Es también útil para la operación y toma de decisiones en el diseño, incluso la optimización del propio diseño. Así, la exergía es la única base racional para evaluar la eficiencia de combustibles y recursos, procesos, mecanismos y sistema, las dispersiones y sus costos, el valor y costo de los rendimientos de los sistemas.

En uno de los más recientes trabajos, Sciubba indicó que los procedimientos importantes del diseño, en una etapa abandonaron reconocer que las irreversibilidades en los procesos y componentes dependen de

Capítulo 1: Sostenibilidad Energética, un paso hacia el Desarrollo sostenible. Estado del Arte.

la 'proporción de degradación' de la energía y no sólo en la proporción entre las intensidades de salida y entrada de los flujos, y que existe una escala de calidad energética que puede ser cuantificada mediante un análisis de la entropía (Sciubba, 2001). En esencia, el legado de este acercamiento, universalmente aceptado, es que la idea de la eficiencia de la conversión basada solamente en la consideración de la primera ley es errónea y engañosa.

El análisis de Exergía, aunque completamente satisfactorio desde un punto de vista termodinámico, siempre se ha considerado como incapaz de determinar el óptimo de un diseño real y, por consiguiente, su uso ha sido asociado con el habitual análisis de costo monetario. Recientemente ha surgido una completa y teóricamente sólida herramienta, basada en una combinación de métodos como el económico y el termodinámico nombrada 'termoeconomía', fue desarrollada para la industria.

En este acercamiento, las eficiencias son calculadas por medio de un análisis exergético y los 'gastos no energéticos' (financieros, mano de obra y costos de mitigación de las afectaciones medioambientales) relacionados explícitamente a parámetros técnicos y termodinámicos del proceso, teniendo en cuenta que la optimización consiste en determinar el punto de diseño y programa de operación que minimizan el costo total (monetario), bajo un juego apropiado de financiación, Restricciónciones normativas, medioambientales y técnicas. A pesar de una larga tradición de opiniones contrarias, la exergía parece poseer una correlación intrínseca muy fuerte y directa con los valores económicos, una de las metas del método de contabilidad exergética extendida (EEA) es explotar esta correlación, para desarrollar una teoría formalmente completa de valor, basada en una métrica energética o monetaria indistintamente. Este es, un método general en que kJ/kg o kJ/kW son consistentemente equivalentes a \$/ kg y \$/ kW respectivamente. Se basa en la idea fundamental de que, mientras la exergía y los costos monetarios puedan tener la misma morfología, su topología (la estructura) puede ser diferente, llevando a la posibilidad de puntos óptimos de diseño diferentes.

1.3.4 Exergía y Medioambiente.

La exergía también se sugiere como la conexión más apropiada entre la segunda ley de la termodinámica y el impacto medioambiental, en parte porque es una medida del cambio del estado de un sistema con respecto al ambiente (Edgerton, 1992). La magnitud de la exergía de un sistema, depende de los estados

Capítulo 1: Sostenibilidad Energética, un paso hacia el Desarrollo sostenible. Estado del Arte.

del sistema y el ambiente. Esta desviación sólo es cero cuando el sistema está en equilibrio con su ambiente, el concepto del ambiente aplicado al análisis exergético es planteado por Kotas (Kotas, 1995).

Una comprensión de las relaciones entre la exergía y el ambiente, puede revelar los modelos fundamentales subyacentes y las fuerzas que alteran los cambios en el ambiente, así como los estudios para disminuir los daños medioambientales. De hecho, Tribus y McIrvine en 1971 sugirieron que realizando un análisis de la exergía de los procesos naturales que ocurren en la tierra, pudiera formarse una función para una planificación ecológicamente segura porque indicaría la perturbación causada por los cambios a gran escala (Tribus, 1971).

1.3.4.1 Exergía, emisiones contaminantes.

La exergía asociada con las emisiones contaminantes puede verse como un daño potencial para el medioambiente. Los desechos, al no estar en equilibrio con el ambiente poseen un alto potencial para producir cambios desfavorables en el medioambiente del sistema analizado. Normalmente, la exergía emitida en los desechos causa daño al ambiente, aunque existen algunas excepciones. Más allá, las emisiones de exergía al ambiente pueden interferir con la entrada neta de exergía proveniente de la radiación solar a la tierra, por ejemplo, las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero que son desechos de procesos, los que causan cambios debido a su concentración en la atmósfera, afectando la recepción e irradiación de la radiación solar por la tierra. La relación entre las emisiones de exergía en la sustancias desechadas y el daño medioambiental se ha reconocido por varios investigadores, como Reistad en 1970 (Reistad, 1970) el que consideró el valor económico de la exergía en los combustibles y desarrolló una tasa de polución del aire para cada tipo de combustible, estimándolo como el costo para eliminar el contaminante o el costo en que tendría que incurrir la sociedad por la polución en forma de un impuesto que debe ser cobrado.

Aquí, podemos resumir los factores claves como sigue:

Los estudios energéticos y ambientales, llevando al incremento de la eficiencia energética, pueden reducir el impacto medioambiental reduciendo las pérdidas de energía. Dentro del alcance de los métodos exergéticos, tales actividades llevan al aumento de la eficiencia exergética.

Capítulo 1: Sostenibilidad Energética, un paso hacia el Desarrollo sostenible. Estado del Arte.

El aumento de la eficiencia puede contribuir, a menudo, de mejor manera a lograr la seguridad energética en condiciones medioambientalmente aceptables por la reducción directa de las emisiones que podrían haber ocurrido.

El aumento de la eficiencia también reduce los requerimientos para los nuevos medios de producción, transporte, transformación y distribución de varias formas de energía; estos medios adicionales llevan algunos impactos medioambientales.

Para controlar la polución medioambiental, las acciones de aumento de la eficiencia necesitan a menudo ser apoyadas por tecnologías apropiadas de control de la polución o sustitución de combustible.

1.3.5 Exergía y Desarrollo Sostenible.

Un suministro estable de recursos energéticos es generalmente necesario, pero no un requisito suficiente para el desarrollo dentro de una sociedad. Además, el desarrollo sostenible demanda un suministro sustentable de recursos energéticos. Las implicaciones de estas declaraciones son numerosas y depende cómo se define dicho término. Al efecto hay dos aspectos vitales que se plantean a continuación:

Una implicación importante de estas afirmaciones es que el desarrollo sustentable dentro de una sociedad, requiere un suministro de recursos energéticos que, al ser disponible a largo plazo, debe ser suministrado en el flujo requerido, de manera sustentable, a un costo razonable y utilizándose en las tareas que se requieran, sin causar impactos sociales negativos.

Una segunda implicación es que el desarrollo sustentable requiere que los recursos energéticos sean usados de la manera más eficiente posible. De esta forma, la sociedad aumenta al máximo los beneficios que se derivan de la utilización de los recursos energéticos, minimizando los impactos negativos asociados con su uso.

La presente tendencia al consumo desmedido de los recursos y la destrucción medioambiental, lleva a la interrogante de ¿por qué no usar la exergía en la sociedad para potenciar el desarrollo sustentable? La persistente negativa de usar el concepto exergía en la sociedad, tiene trágicas consecuencias. Los análisis exergéticos son necesarios si se pretende realizar esfuerzos serios para lograr una distribución más justa de los recursos en el mundo y de nuestra preocupación por las generaciones futuras (Wall, 1993).

1.3.6 Uso de los análisis exergéticos en trabajos anteriores.

La exergía, como ya se ha visto constituye una herramienta poderosa para el logro de la sostenibilidad energética, por lo que se considera importante analizar diferentes trabajos realizados con anterioridad que en la mayoría de los casos, fundamentan el presente trabajo doctoral.

1.3.6.1 Exergía como índice.

Como se mencionó anteriormente la utilización de índices y sistemas de indicadores ha sido un método utilizado para caracterizar sistemas. Como ejemplos de ello se encuentran el Índice de Desarrollo Humano (IDH), el sistema de indicadores elaborado en el marco del proyecto ELANEM y otros que de una manera o de otra, tratan el aspecto energético de forma superficial y, en algunos casos, prácticamente imperceptible, los que pueden, en cierta medida, ser interpretados de manera errónea.

El método exergético no ha quedado excluido de este tipo de análisis. Este método, combinado con otros, se ha utilizado para formular índices que permitan la modelación de ecosistemas, con vistas a predecir su evolución en el futuro, así como a diferentes cambios que en su entorno pudieran producirse (Fath, 2004, Ludovisi, 2003).

Un acercamiento diferente al problema energético medioambiental, ha sido la contabilidad de la energía global en sistemas complejos, análisis energéticos que se basan en la definición de un "Índice Energético Acumulativo " que tiene en cuenta el "Índice de Calidad de la Energía " y así cuantificar la calidad de diferentes portadores energéticos (Nilsson, 1997, Odum, 1996, Ulgiati, 1998).

Los análisis exergéticos también han sido utilizados para lograr la sostenibilidad de áreas urbanas. C. Balocco, S. Papeschi, G. Grazzini y R. Basosi utilizaron la eficiencia, de la primera y la segunda ley como índices termodinámicos que caracterizarán la sostenibilidad de las construcciones en particular y de las áreas urbanas en general (Balocco, 2004). En su metodología, este grupo sostiene un único criterio termodinámico ambiental por la ponderación dada a la eficiencia de segunda ley (eficiencia exergética), lo cual demostraron comparando los resultados de los análisis, utilizando ambas eficiencias. Por otro lado también constataron la relación existente entre la eficiencia exergética y las emisiones contaminantes, durante el ciclo de vida de las construcciones en el sector residencial.

Al analizar el uso de los índices e indicadores para lograr la sostenibilidad, puede concluirse que aunque permiten apreciar el estado de un sistema y, hasta cierto punto, determinar sobre qué aspecto debe

Capítulo 1: Sostenibilidad Energética, un paso hacia el Desarrollo sostenible. Estado del Arte.

actuarse, no permiten por otra parte, decidir la mejor manera de modificar las condiciones, tanto internas como externas del sistema, y así acercarlo a un estado de sostenibilidad más elevado. Existe un sector de tomadores de decisión al que sin dudas, un análisis por medio de índices o sistemas de indicadores les permitiría ganar conciencia del estado del sistema analizado y las zonas en las que se debe actuar para mejorar sus condición, pero a la hora de decidir qué tecnología utilizar o qué portador energético consumir, para cada caso, resulta imprescindible una herramienta de decisión con más posibilidades.

1.3.6.2 La exergía, su relación con la economía.

Al estudiar las condiciones en las que se mueven las sociedades actuales y la gran influencia que sobre la sostenibilidad tiene la economía, se palpa el especial interés de varios autores que han destacado la importancia de este aspecto para el logro de la sostenibilidad, especialmente energética.

Verda V. planteó un acercamiento para el diagnóstico termoeconómico. El procedimiento, inicialmente desarrollado para la situación de anomalías en la explotación de plantas térmicas, la que es extendida para evaluar económicamente la energía recuperada al eliminar las anomalías encontradas. La aplicación de un sistema de mantenimiento basado en el aumento de las irreversibilidades y su costo, por el funcionamiento defectuoso de una o varias partes del sistema, permite tomar las medidas pertinentes para que los sistemas operen con las menores irreversibilidades posible (Verda., 2004).

Traversa A., Massardo A. F., Cazzola W. y Lagorio G. desarrollaron un software que basado en cálculos de balances termoeconómicos, permite la optimización de sistemas energéticos complejos. A este análisis le fue incluido el de ciclo de vida, resaltando los impactos ambientales causados por la combinación de las tecnología seleccionadas (Traversa, 2004). Este trabajo demuestra la posibilidad de generar herramientas para la toma de decisiones en cuanto a qué tecnología o combinación de tecnologías utilizar que satisfagan las necesidades de energía de un sistema.

Es importante señalar que recientemente la Segunda Ley ha sido utilizada junto a la exergía-base del costo del ciclo de Vida como los casos de Ayres en 1998 y Rosen en 2002 (Ayres, 1998, Rosen, 2002) los que incluyen el equilibrio de la energía de un sistema, computado sobre toda su vida útil de trabajo, el daño medioambiental (principalmente tomando el costo de limpieza real o previsto) y el reciclaje, derivados del proceso que pueden re-usarse en otros pasos productivos pudiendo considerarlos rendimientos positivos del balance. Otros autores han preferido realizar análisis termo-exergo-

Capítulo 1: Sostenibilidad Energética, un paso hacia el Desarrollo sostenible. Estado del Arte.

económico (Poredos, 2002, Sollner, 1997, Ulgiati, 1998, Zabalza, 2002, Zhou, 1996). La metodología de Contabilidad Exergética (Sciubba, 1999) puede ser considerada propiamente una síntesis de los diferentes acercamientos descritos con anterioridad.

De lo anterior se puede concluir que la reducción de impactos medioambientales, el crecimiento de la eficiencia de utilización de los recursos, la sostenibilidad energética y la reducción de las emisiones contaminantes, pueden ser dirigidos de mejor forma si se usa el método de la evaluación exergética.

Para alcanzar la Sostenibilidad se apunta a la importancia de la eficiencia energética, las energías renovables y las nuevas tecnologías, tanto para suministro como para el uso final de la energía. Ni Weidou y Thomas B Johansson plantean que existen estrategias y tecnologías energéticas creíbles que permitirán un uso más racional de los recursos energéticos y aseguran los suministros de energía, junto con el mantenimiento de la calidad ambiental de los sistemas (Weidou, 2004).

1.3.6.3 Utilización de los análisis exergéticos para la definición de políticas energéticas.

La exergía ha sido utilizada como una herramienta para la definición de políticas energéticas, siendo una medida de cantidad y calidad de recursos energéticos diferentes. Por otro lado, se han evaluado procesos reales que involucran energía con el propósito de establecer o mejorar políticas ambientales que tengan en cuenta los siguientes aspectos: la calidad, la conservación de la energía, el ambiente, la influencia de la economía y el desarrollo sustentable. Ibrahim Dincer demostró la utilidad de la exergía como herramienta para la elaboración de políticas energéticas (Dincer, 2002) dando pie al desarrollo de procedimientos que permitan la selección de tecnologías o combinaciones tecnológicas que satisfagan las necesidades de energía que una región o sistema posee.

El logro del desarrollo sustentable de un sistema ha sido visto como la media de la sostenibilidad de sus partes más elementales. Slawomir W. Hermanowicz propone la dependencia existente entre la sostenibilidad y los procesos fundamentales, ya sean químicos, transformación física o biológica y transporte de masa, energía y cambios de entropía; enfocando su trabajo en los funcionamientos de las unidades más pequeñas y los procesos, permitiendo que se agreguen en sistemas mayores, considerando explícitamente el horizonte de tiempo en la determinación de la sostenibilidad (Hermanowicz, 2004). Es de destacar en cuanto a este aspecto que para el logro de la sostenibilidad energética, en analogía con los

procesos productivos, resulta imprescindible tener en cuenta el nivel de sostenibilidad de cada uno de los subsistemas definidos dentro del sistema analizado.

Un método innovador para el cálculo de la eficiencia exergética en un sistema energético intensivo y complejo con estructura arbitraria fue descrito por V. Nikulshin, C. Wu, y V. Nikulshina. El método es basado en una nueva ecuación general para calcular la eficiencia exergética total del sistema y en un gráfico de flujo de exergía propuesto por los autores. Este acercamiento permite no sólo obtener la eficiencia exergética total del sistema, sino también mostrar la relación entre la eficiencia exergética de un elemento individual y la de todo el sistema (Nikulshin, 2002). Por otro lado, aunque se aplica para una planta térmica, pudiera tenerse en cuenta para el análisis de matrices de sistemas de transformación energética que suplan la demanda energética de una región determinada.

1.3.6.4 Uso del análisis exergético para el estudio del comportamiento del consumo en sociedades.

La entropía a sido usada como indicador de la sostenibilidad de diferentes áreas, urbanas (Balocco, 2000), zonas agrícolas (Steinborn, 2000); también se usan las variaciones de entropía de un área estudiada como la medida del costo de polución medioambiental mediante la exergía del desecho como acercamiento a la comparación cuantitativa de impactos ambientales (Seager, 2002).

Para la evaluación energética de las economías, resulta vital el método de agregación de los que existen varios, pero ninguno se encuentra mundialmente aceptado y es precisamente la agregación de los recursos energéticos por su calidad, el método más aceptado. Cleveland Cutler J., Kaufmann Robert K. y Stern David I. realizan un análisis de la economía de Estados Unidos de América durante el período de 1954 a 1992 utilizando para ello, las calidades de la energía entregada en exceso y su relación con el PIB, demostrando la importancia del uso de esta forma de agregación de los portadores energéticos (Cleveland, 2000).

En trabajos anteriores se han planteado una serie de condiciones para el diseño de sistemas de transformación energética en armonía con el ambiente. Wall ha planteado ciertas condiciones y herramientas para el diseño y explotación de sistemas de transformación energética (Wall, 2002), además de resaltar la importancia del uso de la exergía como herramienta para analizar sistemas, tanto de transformación, degradación, como sociedades.

El concepto exergía y los balances energéticos, han sido utilizados como herramienta para la evaluación de los flujos energéticos de sistemas complejos, como vía del incremento de la eficiencia en el uso de

Capítulo 1: Sostenibilidad Energética, un paso hacia el Desarrollo sostenible. Estado del Arte.

los recursos naturales y tiene como una de sus aplicaciones el análisis de diferentes sociedades. Ejemplos de ello pueden citarse los trabajos de Wall G. sobre la conversión de exergía en la sociedad de Ghana (Wall, 1978), el caso de Suecia en los años 1920, 1975 y 1980 (Wall, 1986, Wall, 1987), Japón (Wall, 1990), la comparación entre la sociedad Japonesa y la Sueca (Wall, 1991).

Ivar S. utilizó el análisis exergético para evaluar la sociedad noruega en el año 1995. Para el estudio tuvo en cuenta los flujos exergéticos que entran al sistema analizado, tuvo en cuenta la energía hidráulica, combustible fósil, minerales como el aluminio y el hierro, cereales, pesca, caza y madera. Como resultado, verificó la eficiencia de la utilización de los flujos exergéticos en varios sectores de la sociedad noruega (Ivar, 2000).

Posteriormente, Ivar S. y Ertesva G., realizaron un estudio de varias sociedades, Suecia, Ghana, Japón, Italia y Noruega comparando los resultados del análisis y resaltando las diferencias (Ivar, 2001). En este trabajo, fue verificada una variación en la eficiencia exergética entre un 0.1 y un 0.3% y constaron que en el sector residencial-comercial es donde ocurren las mayores irreversibilidades. Por otra parte, en los países donde la electricidad de las plantas térmicas resulta una contribución significativa con respecto al uso final, también poseen grandes irreversibilidades en los procesos de transformación.

El estudio del mejoramiento de la eficiencia energética en los sectores de la economía ha sido ampliamente abordado. Tanatvanit S., Limmeechokchai B. y Chungpaibulpatana S. trabajaron en el desarrollo de un modelo que permitiera determinar los aspectos vinculados con la eficiencia en el uso de la energía en tres sectores de la economía Tailandesa (residencial, industrial y transporte) y las posibilidades del uso de las energías renovales en la generación de energía eléctrica (Tanatvanit, 2003). Este trabajo permite la valoración de diferentes escenarios y las posibles reducciones en el consumo de derivados del petróleo así como la consecuente reducción de las emisiones de CO₂ por el incremento de la eficiencia tecnológica, además del uso de recursos renovables; sin embargo, careció del enfoque de la segunda ley tan apropiados para la determinación de las irreversibilidades en que se incurren, en cada uno de los sectores de la economía Tailandesa. Tampoco tuvieron en cuenta el aspecto económico de las modificaciones propuestas con la profundidad requerida.

Otros estudios han evaluado la eficiencia en la utilización de la energía como el realizado por Zafer Utlu y Arif Hepbasli en el sector residencial-comercial turco para el año 2001, usando tanto el análisis energético como el exergético (Zafer, 2003). En este estudio se calcularon la entrada de exergía, el consumo de combustible anual en calefacción, consumo de agua para calefacción, consumo energético

Capítulo 1: Sostenibilidad Energética, un paso hacia el Desarrollo sostenible. Estado del Arte.

en actividades de cocción, así como la energía eléctrica usada en el sector en el año en cuestión, calculando la eficiencia exergética en el uso de cada uno de los portadores energéticos utilizados. El estudio demostró la necesidad de los estudios sobre la eficiencia energética, para la mejor utilización de los recursos disponibles.

El análisis de las causas del crecimiento económico y la disminución de sus potencialidades en la actualidad, para seguir impulsando la economía fueron discutidos por Ayres Robert U. (Ayres, 2002) demostrando, a través de un análisis energético, el comportamiento de la economía de Estados Unidos en el período comprendido entre 1900 y 1998, la gran influencia que posee sobre el consumo el precio de la energía final, siendo denominado como “motor de crecimiento”. Por otro lado, demostró cómo los precios de la energía disminuyen con el incremento de la eficiencia, provocando a su vez un incremento de la demanda, el cual llamó “efecto rebote”. Este estudio demuestra, según se entiende, que si bien resulta importante el incremento de la eficiencia, tanto de los procesos de transformación de la energía como el de su consumo final; resulta preciso determinadas regulaciones que eviten el incremento de la demanda. De esta manera se disminuye el consumo de los recursos disponibles y la producción de desechos. Si resultasen imprescindibles estos incrementos en la demanda, podrían ser cubiertos por medio de recursos renovables consumiéndolos a un ritmo menor o igual que su capacidad de regeneración.

Otro trabajo realizado fue el análisis de la energía para un desarrollo sostenible en China (Weidou, 2004). En este se resaltan una serie de medidas que pueden ser tomadas, desde el punto de vista energético para lograr la sostenibilidad.

Varias sociedades han tomado conciencia de los riesgos que se corren en un futuro cercano, tal es el caso de Suiza. François Marechal, Daniel Favrat y Eberhard Jochem realizaron un análisis de la sociedad suiza verificando, a través de un análisis energético, los puntos de mayores irreversibilidades y las posibilidades, en cuanto al incremento de la eficiencia exergética que las tecnologías actuales permiten (Marechal, 2004). Este estudio también pone de manifiesto el potencial que la tecnología actual brinda para la reducción de los consumos de recursos naturales. Es importante destacar la pobre alusión a las fuentes renovables de energía y sus tecnologías, así como el aspecto económico.

Varios estudios anteriores sugieren que el impacto medioambiental del uso de la energía y el logro del aumento de la eficiencia en los sistemas energéticos, pueden ser evaluados mediante análisis basados en la Segunda Ley de la Termodinámica (Gong, 2001, Moran, 1994, Rosen, 2002). Las irreversibilidades

de los procesos y sus componentes, dependen de la proporción de degradación energética y no sólo de la proporción entre las intensidades de rendimiento y flujos de entrada, por lo que la calidad de energía puede ser cuantificada mediante el análisis de entropía.

1.3.6.5 La exergía y las energías renovables.

La crisis del petróleo ha hecho mayor la necesidad de nuevas fuentes de energía. Las fuentes de energía renovables podrían proporcionar una solución al problema, ya que estos recursos son inagotables y tienen impactos menos adversos sobre el ambiente, en comparación con los combustibles fósiles. Por otro lado, todavía la tecnología de transformación de fuentes energéticas renovables no puede ser considerada competitiva, en comparación con las tecnologías de transformación de los combustibles fósiles. El uso de la energía proveniente del sol (energía), sin dudas, podría paulatinamente ir cubriendo la demanda energética de la sociedad actual (Hau, 2004). Aunque con muchos críticos, los más recientes estudios permiten valorar esta vía como una oportunidad real.

Botero realiza un pormenorizado estudio y desarrolla las herramientas metodológicas que permiten realizar la valoración física de los recursos naturales y el capital natural de la tierra, así como aplicar dichas herramientas para realizar una primera valoración del capital natural contenido en las reservas de minerales (con un error de $\pm 6\%$), el agua y los combustibles fósiles (Botero, 2000), allanando el camino para la determinación de la exergía de los recursos energéticos y no energéticos que entran a un sistema dado. Este autor plantea una nueva unidad de medida energética denominada tlep (toneladas limpias equivalentes de petróleo), la cual permite expresar el Capital Natural Limpio, como aquella reserva de energía fósil que aunque se usara en su totalidad, no tendría consecuencias desastrosas para el medio ambiente.

Estudios recientes, con el apoyo del análisis energético, han permitido llegar a conclusiones interesantes. Koroneos C., Spachos T. y Moussiopoulos N. centraron su estudio en tres de las llamadas energías renovables; la solar térmica y fotovoltaica, la eólica y la geotérmica analizando su competitividad para el caso de Grecia (Koroneos, 2003). Como resultado de su análisis, comprobaron que algunos de los sistemas parecen tener altas eficiencias llegando a ser en algunos casos de mayor valor que sistemas que utilizan fuentes de energía no renovables. En otros casos, como la solar fotovoltaica, las eficiencias son más bajas a la hora de satisfacer las necesidades eléctricas de ciudades. De esta forma se demuestra que

Capítulo 1: Sostenibilidad Energética, un paso hacia el Desarrollo sostenible. Estado del Arte.

resulta posible la utilización de estos recursos, aún cuando las eficiencias de las tecnologías de conversión de los recursos renovables sean bajas, ya que las mismas compensan esta deficiencia con el hecho de que son inagotables. Por otra parte, es de señalar la no inclusión en el análisis del aspecto del costo de las tecnologías utilizadas en cada caso.

La biomasa, resulta un recurso renovable disponible en países netamente agrícolas como alternativa energética, con vistas a lograr la sostenibilidad energética, lo que ha sido ampliamente debatido y estudiado, ya que la misma permite el aprovechamiento de una parte de la energía solar que diariamente llega desde el sol. Este recurso ha sido utilizado en Brasil en la producción de energía eléctrica y calor (Pérez, 2005).

El crecimiento de la población y el incremento del consumo de energía, por el estilo de vida, resultan razones para el aumento de la demanda de energía. Considerando la disminución de los recursos energéticos no renovables en la naturaleza, se considera que los recursos renovables tomarán mayor preponderancia en los próximos años. Iniyán utilizando el método Delphi, determino el nivel de aceptación social en el uso de fuentes de energía renovables. Por otra parte, valoró que el 25% de la demanda de energía total pudiera ser proveniente de fuentes renovables, para el caso del año 2020±2021 en la India (Iniyán, 2000).

En tal sentido, se han desarrollado trabajos encaminados a la determinación de la factibilidad del uso de los recursos de la biomasa, para proveer de recursos energéticos a sistemas sociales e industriales. Un ejemplo ha sido el desarrollado por Claassen (Claassen, 1999), el cual ha estudiado los métodos de fermentación para la producción de etanol, la obtención de metano a partir de sistemas de purificación de aguas negras, para la obtención de la energía inherente a las mismas. También teniendo en cuenta la obtención por métodos biológicos de hidrógeno. Como parte de este trabajo, Claassen propone un nuevo camino para la evaluación y comparación, al tener en cuenta los valores del “trabajo contenido” y el trabajo perdido. Por otra parte, establece que debido a los problemas para la transportación de los productos que analiza, será imposible que estas tecnologías sean competitivas, hasta tanto no se internalicen los costos de los impactos asociados al uso de los portadores energéticos provenientes de los combustibles fósiles.

En cambio, Siddiqui, A. S. et al. planteó un modelo económico para la selección de las tecnologías de conversión de energía, para proveer de calor y electricidad a regiones determinadas, prestando vital importancia a los aspectos económicos, eficiencia en la conversión y teniendo en cuenta para estos

Capítulo 1: Sostenibilidad Energética, un paso hacia el Desarrollo sostenible. Estado del Arte.

estudios, el análisis exergético (Siddiqui, 2003a). Este trabajo resulta un paso de avance para el logro de la sostenibilidad energética.

1.4 Conclusiones parciales:

La humanidad jamás alcanzará el paradigma de la sostenibilidad, hasta tanto no alcance la sostenibilidad energética, ya que el centro de la actividad material de las sociedades y parte de la espiritual dependen de la energía.

No fue encontrada una herramienta lo suficientemente completa que permita cuantificar el nivel de sostenibilidad energética de un sistema dado, ni definir las áreas o subsistemas que intervienen negativamente sobre su estado de sostenibilidad. El contar con tal herramienta permitiría la realización de análisis espacio temporales que contribuirían a la obtención de la sostenibilidad energética.

De los métodos utilizados para la cuantificación parcial de la sostenibilidad, solo los sistemas de indicadores y los análisis exérgicos constituyen herramientas capaces de contribuir a un procedimiento que permita realizar valoraciones del estado del nivel de desarrollo sostenible de un sistema dado.

No fue encontrado en la bibliografía consultada una herramienta que permita la selección de una matriz energética que supla la demanda energética basada en criterios que favorezcan el alcance de la sostenibilidad energética ambiental.

Para alcanzar la sostenibilidad energética resulta necesario tener en cuenta cuatro aspectos fundamentales: la limpieza de la energía consumida, la proporción de renovabilidad de la energía consumida, la eficiencia de las transformaciones energéticas y de su degradación, así como la capacidad de un sistema de auto abastecerse energéticamente.

Capítulo 2. Procedimiento para alcanzar la Sostenibilidad Energética.

2.1 Introducción.

A criterio de varios investigadores como Wall G., Cornelissen, Dincer y con los que coincide el autor, la humanidad jamás alcanzará el paradigma de desarrollo sostenible hasta tanto no alcance la sostenibilidad energética, debido a que el centro, alrededor del cual gira la actividad material de las sociedades, es la energía, (Wall, 1993, Cornelissen, 1997, Dincer, 1998).

En la revisión bibliográfica realizada no se encontraron reportes de herramientas capaces de cuantificar el nivel de sostenibilidad energética de un sistema dado, de definir las áreas o subsistemas que concentran la mayor parte de las irreversibilidades, lo cual afecta su estado de sostenibilidad ni que permita servir de base para la selección de una matriz energética que supla la demanda de energía, de tal forma que se alcancen altos niveles de sostenibilidad energética. Es por este motivo que el objetivo de este capítulo consiste en proponer un procedimiento que permita alcanzar los aspectos anteriores(Ocaña, 2006a).

2.2 Consideraciones para el desarrollo de los procedimientos propuestos.

Para el desarrollo de los procedimientos propuestos, es necesario realizar una serie de suposiciones que establezcan sus bases. Se considera, para el desarrollo del presente trabajo que:

El **desarrollo sostenible** es aquel que respeta la condición y capacidad limitada del sistema que resulta analizado, buscando la satisfacción de las necesidades sociales presentes sin llegar a agotar las fuentes de recursos, para suplir las necesidades en un futuro indefinido aprovechando al máximo los recursos y disminuyendo la emisión de sustancias contaminantes, que de una forma o de otra, limitan la capacidad del medio para proveer recursos.

Los métodos utilizados para la cuantificación parcial de la sostenibilidad, hasta el momento, no permiten definir correctamente el nivel de sostenibilidad de un sistema dado, ni son capaces de brindar los elementos que indiquen el camino para alcanzarlo. Solo el uso de índices y sistemas de indicadores,

Capítulo 2. Procedimiento para alcanzar la Sostenibilidad energética.

complementados con análisis exergéticos, podría ser la base para una herramienta capaz de contribuir al logro de la sostenibilidad energética.

Se entiende como sostenibilidad energética, la capacidad de un sistema para cubrir sus consumos de energía a lo largo del tiempo, realizando la menor contaminación posible, ya sea directa o indirecta.

La sostenibilidad energética de un sistema puede ser vista como la agregación de los niveles de sostenibilidad de los subsistemas que lo componen, pudiendo producirse cierta compensación o afectación entre ellos.

Para alcanzar la sostenibilidad energética es necesario tener en cuenta los factores que sobre la misma influyen, los factores fundamentales son:

Grado de renovabilidad de la energía consumida en el sistema esta es siendo esta la parte del consumo total de energía que resulta cubierta por medio de energías renovables.

Eficiencia de las transformaciones y degradaciones energéticas utilizadas para cubrir el consumo del sistema.

Grado de limpieza de la energía consumida, entendiéndose como el nivel de captura de las sustancias contaminantes que son generadas en las tecnologías de transformación existentes en el sistema, ya sea por medios naturales, como por métodos tecnológicos. Esto es una medida de la contaminación ambiental producida por las transformaciones energéticas.

Grado de auto abastecimiento energético del sistema, entendiéndose como la capacidad de un sistema para auto satisfacerse de energía.

Sistema es aquella región, con menor extensión posible que posea capacidad para la toma de decisiones en el tema energético. Su estructura estará formada por los sectores de la economía. En el presente trabajo serán utilizados: el sector Industrial, Transporte, Agricultura, Comercio, Población y Otros.

2.3 Factores que influyen sobre la sostenibilidad energética.

Como ya se ha comentado existen cuatro factores que influyen sobre la sostenibilidad energética: Grado de renovabilidad de la energía consumida en el sistema, Eficiencia de las transformaciones energéticas, Grado de limpieza de la energía consumida y Grado de auto abastecimiento energético del sistema.

Estos factores se tendrán en cuenta para el modelo matemático y a continuación se abordará su definición y uso(Ocaña, 2006a).

2.3.1 Renovabilidad de la energía consumida en los sistemas.

Los portadores energéticos constituyen la base primaria para la producción de energía de alta calidad (eléctrica o mecánica). Estos recursos, según su ritmo de restitución o renovación, pueden ser llamados renovables o no renovables. Los recursos con elevada capacidad de renovación como: la radiación solar, las corrientes o saltos de agua, las olas marinas, las mareas, circulación de los vientos, el calor geotérmico y la biomasa, son considerados recursos renovables. Por otro lado, otros recursos con muy baja o ninguna capacidad de restitución como: el petróleo y sus derivados, carbón mineral y metales pesados utilizados en reactores de fisión, son considerados como no renovables(Ocaña, 2006a).

El desarrollo tecnológico actual se basa fundamentalmente en los portadores no renovables, por su alto poder calórico y su baja entropía. A la hora de realizar un análisis de la disponibilidad de la energía puede observarse que para los portadores no renovables o con baja capacidad de renovabilidad, dicha disponibilidad va disminuyendo en la misma proporción con que son consumidos; de esta forma son significativos los volúmenes emitidos de sustancias contaminantes, mientras que los portadores renovables, en su gran mayoría, poseen una baja concentración de energía o la misma se encuentra muy dispersa, aunque tiene la ventaja de emitir solo pequeñas cantidades de sustancias contaminantes al medio (Ocaña, 2006a).

Por otro lado, debe destacarse que la cantidad total de exergía que puede ser extraída de los portadores renovables excede significativamente la necesaria para cubrir la demanda actual (Turrini, 1999), de esto se deduce que el camino más seguro es el que potencia el uso de las fuentes renovables. Por lo anteriormente expresado se concluye que la sociedad, cuyo consumo de exergía provenga, en su mayor parte, de portadores renovables, estará más cerca de la sostenibilidad energética que la que no los utiliza.

Varios autores han planteado la necesidad de tener en cuenta la potenciación del uso de las fuentes renovables Ni Weidou y Thomas B Johansson resaltan la existencia de un gran potencial en el uso de las energías renovables, porque disminuyen la contaminación ambiental y garantizan la seguridad en el suministro energético, para el caso de China (Weidou, 2004). En el análisis realizado por Tanatvanit S., Limmeechokchai B. y Chungpaibulpatana S., también consideraron las posibilidades del uso de las

Capítulo 2. Procedimiento para alcanzar la Sostenibilidad energética.

energías renovables en la generación de energía eléctrica (Tanatvanit, 2003). Por su parte, Hau J. considera que el uso de la energía proveniente del sol (energía) podría, paulatinamente, ir cubriendo la demanda energética de la sociedad actual (Hau, 2004).

Koroneos C., Spachos T. y Moussiopoulos N. demostraron, para el caso particular de Grecia, la competitividad del uso de algunas de las fuentes renovables (Koroneos, 2003). También Raúl Pérez fundamenta el potencial contenido en la biomasa para países eminentemente agrícolas, especialmente para el caso de Cuba (Pérez, 2005), a su vez Iniyar, a partir del potencial existente en la India planteó la posibilidad de cubrir la demanda de energía por medio de estas fuentes (Iniyar, 2000).

Claassen desarrolló trabajos encaminados a la determinación de la factibilidad del uso de los recursos de la biomasa, para proveer de recursos energéticos a sistemas, tanto sociales como industriales, específicamente para el caso del etanol, la obtención de metano a partir de sistemas de purificación de aguas negras y la obtención de hidrógeno por métodos biológicos (Claassen, 1999).

En el caso de Jo Dewulf también ha desarrollado trabajos utilizando como base los análisis exergéticos y los vincula con el análisis de ciclo de vida. En sus trabajos ha profundizado en los aspectos de la renovabilidad de los procesos productivos (Dewulf, 2000) y en el consumo exergético para la limpieza de sustancias contaminantes que existen en los gases como resultado de la combustión (Dewulf, 2003).

En el trabajo "Illustrations towards quantifying the sustainability of technology" publicado por Jo Dewulf (Dewulf, 2000), se define un coeficiente de renovabilidad de la energía consumida en un sistema dado. Este coeficiente será tomado como base para la definición del Indicador llamado de Renovabilidad Exergética (α) y se definirá por la ecuación (2.1).

$$\alpha = \frac{\sum_i Br_i}{B_t} \quad (2.1)$$

donde:

Br_i , es la exergía consumida proveniente de la tecnología de transformación (i) que utiliza portadores renovables, en (PJ)

B_t , es la exergía total consumida en el sistema analizado, en (PJ)

$$B_t = \sum_i (Br_i + Bnr_i) \quad (2.2)$$

donde:

$B_{nr\ i}$, es la exergía consumida en el sistema proveniente de la tecnología de transformación (i) que utiliza portadores no renovables, en (PJ)

Sustituyendo (2) en (1) se obtiene:

$$\alpha = \sum_i \frac{Br_i}{(Br_i + Bnr_i)} \quad (2.3)$$

Como se interpreta de la expresión anterior, (α) es directamente proporcional al consumo de exergía proveniente de portadores renovables (Br), beneficiándose con su incremento. Por el contrario, un incremento del consumo de exergía proveniente de portadores no renovables (Bnr) provocaría una disminución del valor de (α).

Por otro lado (α) tomará valores en el intervalo de (0-1) siendo $\alpha = 1$ el valor más deseado, ya que significaría que la exergía consumida en el sistema proviene, en su totalidad, de fuentes renovables de energía. En el caso en que $\alpha = 0$ indicaría que la exergía que se consume en el sistema se obtiene de fuentes no renovables de energía (Ocaña, 2006b).

2.3.2 Indicador de limpieza de la exergía utilizada en los sistemas de transformación que proveen de exergía al sistema.

La sostenibilidad energética dependerá del impacto que las tecnologías utilizadas provoquen sobre el medioambiente. Por esta razón, en la presente investigación se propone un índice de limpieza de la exergía consumida (β), el que indicará cuánto contaminan al medio las tecnologías utilizadas en la transformación energética necesaria para satisfacer los consumos energéticos del sistema. Se parte del supuesto de considerar como Exergía Limpia aquella que durante su producción no genera daño al medio ambiente (Ocaña, 2006b, Martínez, 2003).

Este índice permitirá conocer la parte de los contaminantes que resultan eliminados del flujo total de sustancias contaminantes y será calculado para cada sustancia contaminante, cada portador energético y cada tecnología de transformación energética utilizada. Debe aclararse que al ser considerado el sistema como abierto, resulta imprescindible que se tengan en cuenta las emisiones, tanto directas como

Capítulo 2. Procedimiento para alcanzar la Sostenibilidad energética.

indirectas que se producen en el sistema por la importación de energía secundaria. Para de definición del presente indicador se realizó el siguiente análisis (Ocaña, 2006b).

$$\beta \begin{cases} \text{Daño} = 0 \rightarrow \beta_k = 1 \\ \text{Daño} = \text{máx.} \rightarrow \beta_k = 0 \end{cases}$$

La formulación de β para un portador, será realizada en función al daño ambiental provocado por su uso, expresándolo de la siguiente manera:

$$\beta_p = 1 - \frac{\text{Daño}}{\text{Daño}_{\text{máximo}}} \quad (2.4)$$

Donde

$$\text{Daño} = \sum_k w_k \left(1 - \frac{Ab_k}{w_k} \right) \phi_k \quad (2.5)$$

Donde,

Ab_k , es la cantidad de sustancias contaminantes (k) que resulta abatida de los desechos generados por la tecnología (i) cuando utiliza el portador (p), en (kg)

W_k , es la cantidad de sustancias contaminantes (k) producida en el proceso de transformación del portador energético (p), en (kg)

k , tipo de sustancia contaminante

ϕ_k , factor de daño ambiental.

En la actualidad existe un fuerte debate alrededor de la definición de un factor que permita cuantificar el daño generado por las sustancias contaminantes emitidas al medio. Al respecto existen caminos: el análisis del daño a través de las Externalidades y mediante el costo energético de abatimiento. Ambos serán analizados más adelante.

Por otro lado, el daño máximo se calculará como

$$(\text{Daño})_{\text{máximo}} = \sum_k w_k \phi_k \quad (2.6)$$

Capítulo 2. Procedimiento para alcanzar la Sostenibilidad energética.

El cálculo del índice de limpieza para un portador (β_p) será calculado mediante la expresión:

$$\beta_p = 1 - \frac{\sum_k w_k \left(1 - \frac{Ab_k}{w_k}\right) \phi_k}{\sum_k w_k \phi_k} \quad (2.7)$$

Para el cálculo del índice de limpieza para un subsistema cualquiera, se utilizará como peso, la relación entre la cantidad de exergía consumida relacionada a cada portador (p) y el total de exergía consumida en el subsistema.

$$\beta_k = \frac{\sum_p B_p \beta_p}{B_k} \quad (2.8)$$

El análisis para el caso del sistema total se tomará una forma muy parecida:

$$\beta = \frac{\sum_s B_s \beta_s}{B_t} \quad (2.9)$$

El índice (β) tomará valores entre 0 y 1, dependiendo de los valores de la cantidad abatida de cada una de las sustancias contaminantes que se producen. A medida que el valor de (Ab) se acerque al de (W) más cerca de la unidad se encontrará el valor de (β).

Para el cálculo de las cantidades de las sustancias contaminantes emitidas por cada una de las tecnologías (i) existentes en el sistema para la transformación energética serán utilizados los factores de emisión publicados por la EPA en su informe (U.S. Environmental Protection Agency., 1998) los que se muestran en el anexo 2. En dicho reporte se expresan los valores de los factores de emisión, en función del tipo de portador utilizado en el proceso de conversión.

La determinación de la cantidad de sustancia abatida del flujo contaminante efectuada en la tecnología de transformación (i) debe ser tomada de los datos que existan en cada uno de los emplazamientos de las tecnologías de transformación utilizadas en el sistema.

2.3.3 Indicador de auto satisfacción de la demanda de exergía del sistema.

Como ya ha sido explicado, el nivel de sostenibilidad de un sistema estará relacionado con el nivel que posean los subsistemas que lo componen, integrándose y compensándose unos con otros de manera que los subsistemas puedan, de alguna manera, contribuir al logro de la sostenibilidad energética del sistema en cuestión. Por eso resulta importante destacar la necesidad de que los sistemas energéticos posean seguridad en su suministro energético durante un tiempo prolongado. Como se conoce, los portadores energéticos varían en su precio de comercialización con gran facilidad, sobre esta variación influyen: la demanda del portador y su relación con la oferta o disponibilidad del portador energético, situaciones políticas y el clima, por solo citar los más influyentes (Ocaña, 2006a).

Si se parte de la premisa de que la sostenibilidad de un sistema es la suma de la sostenibilidad de los subsistemas que lo componen, resultará necesario que cada subsistema sea capaz, en alguna medida, de autosatisfacerse energéticamente. Por ello, se plantea un indicador que tiene en cuenta la capacidad del sistema de autoabastecerse de exergía (γ).

$$\gamma = \frac{\sum_p^o (B_{pro_p})}{B_T} \quad (2.10)$$

donde:

γ , indicador de auto satisfacción exergética, adimensional.

B_{pro_p} , exergía obtenida a partir de recursos extraídos del propio sistema (PJ)

Este término se encuentra formado por la sumatoria de la exergía extraída de portadores renovables y de los no renovables disponibles en el propio sistema, siguiendo la siguiente ecuación:

$$B_{pro} = \sum_p^o (B_{r_p} + B_{nr_p}) \quad (2.11)$$

Capítulo 2. Procedimiento para alcanzar la Sostenibilidad energética.

El indicador de auto satisfacción exergética impulsará la explotación de los recursos energéticos propios del sistema, en especial los renovables, favoreciéndose el manejo adecuado de los recursos naturales que existen, por lo que disminuye la exergía consumida durante la transportación de los portadores energéticos importados.

Al igual que los indicadores anteriores, el de Autosatisfacción Exergética, tomará valores en el intervalo de (0-1). Al tomar el valor $\gamma = 1$, indicará que el sistema es capaz de auto abastecerse energéticamente, siendo este el mejor escenario. Al tomar el valor $\gamma = 0$, indicará la incapacidad total del sistema para satisfacer su consumo de exergía, es el peor resultado a la hora de realizar los análisis (Ocaña, 2006b).

2.3.4 Cálculo del Indicador de Eficiencia Exergética de los sistemas de transformación que proveen de exergía al sistema.

Es importante tener en cuenta, para el análisis de la sostenibilidad energética, la eficiencia total de un sistema relacionado con la conversión de energía. Esta eficiencia resulta una función sobre la que influyen algunos factores subjetivos y otros de carácter objetivo. En cuanto a los subjetivos, se encuentra el nivel de conocimiento del desarrollo de la tecnología existente en el momento actual, además de la voluntad política que impulse a la humanidad por el camino de la sostenibilidad, los que resultan difíciles de cuantificar. Los aspectos de carácter objetivo, como el nivel tecnológico del equipamiento instalado para la transformación energética, el que puede ser expresado a través de la eficiencia exergética de los mismos, pueden ser calculados con relativa facilidad. Por lo anterior se entiende que el Índice de eficiencia será una función de la eficiencia exergética de cada una de las tecnologías utilizadas en el sistema(Ocaña, 2006a).

La eficiencia de Segunda Ley (Ψ) rara vez puede ser encontrada en los datos que provee el fabricante de la tecnología, no así la de primera ley. La eficiencia de Primera Ley se expresa de diferentes formas las que se muestran a continuación:

a) En función de la relación entre la cantidad de portador de energía secundaria producido (m_s) entre la cantidad de portador de energía primaria (m_p) o secundaria que entra a la tecnología de transformación expresándose como sigue, (kg/kg).

Con el propósito de obtener el valor de eficiencia de segunda ley utilizando como base la eficiencia de primera ley expresada de la forma anterior se utiliza la siguiente ecuación.

$$\psi_i = \frac{e_s}{e_p} \eta_i \quad (2.12)$$

donde,

e_s , exergía específica del portador de energía secundaria que sale del sistema de transformación (i)

e_p , exergía específica del portador de energía primaria que entra al sistema de transformación (i)

Para el caso en que se obtengan varios portadores de energía secundaria en la tecnología de transformación analizada, será necesario disponer de la totalidad de los datos de entrada y salida de la tecnología analizada para calcular, directamente, la eficiencia exergética (Ocaña, 2006b).

$$\psi_i = \frac{\sum (e_s m_s)}{e_p m_p} \quad (2.13)$$

donde:

$\Psi_{(i)}$, eficiencia exergética de la tecnología (i), adimensional.

e_p , exergía específica del portador de energía primaria (p) que entra al sistema, en (kJ/kg)

e_s , exergía específica del portador de energía secundaria (p) en (kJ/kg)

m_p , cantidad de portador de energía primaria que entra a la tecnología de transformación en (kg)

m_s , cantidad de portador de energía secundaria que sale de la tecnología de transformación en (kg)

η_i , eficiencia de primera ley de la tecnología (i)

b) En función del consumo específico de combustible (G) expresado en kilogramos de combustible consumido del portador (p), por kilowatt hora producido por la tecnología (i) (kg/kWh), para el cálculo de la eficiencia exergética a partir de (G), se utilizará la expresión:

$$\psi_{(i)} = \frac{1}{e_c G_i} \quad (2.14)$$

donde:

e_c , exergía específica del portador utilizado, en (kJ/kg)

G_i , consumo específico de combustible de la tecnología (i), en (kg/kWh)

La eficiencia exergética total ($\Psi_{(T)}$) con que es transformada la energía primaria o con que es concentrada la exergía contenida en el portador (p) que resulta utilizado, podrá ser calculada mediante la ecuación (Ocaña, 2006b):

$$\lambda = \frac{\sum_i \psi_{(i)} B_{(i)}}{B_T} \quad (2.15)$$

Donde

λ , eficiencia exergética total del sistema analizado, adimensional

$\Psi_{(i)}$, eficiencia exergética de la tecnología (i), adimensional.

$B_{(i)}$, exergía producida en la tecnología (i), (PJ)

B_T , exergía total producida en la tecnología (i), (PJ)

Como se puede apreciar el indicador λ resulta directamente proporcional a las eficiencias exergéticas de cada una de las tecnologías (i), afectadas por el peso que sobre la eficiencia total del sistema tiene cada una de ellas.

2.4 Índice de Sostenibilidad Energético Ambiental.

Como se ha visto, los sistemas de índices e indicadores poseen como principal dificultad la forma de combinar los indicadores en un solo índice, expresando la influencia de cada uno de ellos sobre el índice que se pretende evaluar. Por esta razón, a la hora de integrar los niveles de renovabilidad de la exergía

Capítulo 2. Procedimiento para alcanzar la Sostenibilidad energética.

consumida, eficiencia de la producción de exergía, limpieza de la exergía consumida y el nivel de autosatisfacción energética, en un índice que muestre el nivel de sostenibilidad energética del sistema (I_{SE}), aparece la dificultad de cómo expresar la influencia variable, que cada uno de estos indicadores ejercen sobre el Índice de Sostenibilidad Energética, el que será planteado como función (Ocaña, 2006b).

El Índice de Sostenibilidad Energética será planteado como función de α , β , γ , λ .

$$I_{SE} = f(\alpha, \beta, \gamma, \lambda) \quad (2.16)$$

Uno de los métodos mundialmente utilizados, es la asignación de pesos según criterios de expertos. Este método posee como principal deficiencia la dispersión que puede encontrarse en los criterios de los especialistas consultados, ya que los mismos viven y se desenvuelven en condiciones diferentes, lo que influirá notablemente a la hora de asignar pesos en el proceso de integración de los indicadores anteriores.

Para la conformación del Índice de Sostenibilidad Energética, se propone un coeficiente de peso basado en las irreversibilidades que se relacionan con cada uno de los indicadores que toman parte del procedimiento propuesto.

Al utilizar coeficientes de peso (CP), el Índice de Sostenibilidad Energética se propone que adopte la siguiente estructura:

$$I_{SE} = \sigma_{\alpha}\alpha + \sigma_{\eta}\eta + \sigma_{\beta}\beta + \sigma_{\gamma}\gamma \quad (2.17)$$

donde

σ_{α} , CP correspondiente al nivel de renovabilidad de la exergía consumida en el sistema, adimensional

σ_{β} , CP correspondiente a la limpieza de la exergía consumida, adimensional

σ_{γ} , CP correspondiente a la auto satisfacción exergética del sistema, adimensional

σ_{λ} , CP correspondiente a la eficiencia de los sistema de transformación energética, adimensional

2.4.1 Coeficientes Peso.

En la presente investigación se establece como aporte, la utilización de CP y su aplicación de manera preliminar, para determinar la influencia de cada uno de los indicadores propuestos para conocer del nivel de sostenibilidad energética de un sistema dado.

Es preciso señalar, que no existe en la actualidad un procedimiento formal, para hallar la agregación óptima de los indicadores que se relacionan con la sostenibilidad energética. Por esta razón, se propone una formulación matemática que relaciona la irreversibilidad total I_T del sistema a la irreversibilidad asociada a cada uno de los indicadores utilizados I_a del elemento (a) perteneciente al sistema, cuando se hace variar el parámetro x_b .

En la presente investigación, las irreversibilidades se tienen en cuenta, como el costo exergético relacionado a cada uno de los indicadores y el comportamiento de la variación de éste, con respecto al costo exergético total en que se incurre para proveer de energía al sistema (Ocaña, 2006b).

Se denomina costo exergético a la exergía que se consume durante la producción y traslado de la exergía requerida por el sistema analizado. El costo exergético se encuentra compuesto, por una parte inevitable, que corresponde con las limitaciones propias de los ciclos de transformación energética y otra relacionada a las irregularidades que pueden ser evitadas, ya sea por una gestión adecuada de los procesos de transformación, transportación-transmisión y distribución de los portadores energéticos.

Siguiendo los criterios anteriores, se formulará el Coeficiente Peso como la parte del costo exergético total, del sistema que corresponde a cada uno de los aspectos que se relacionan con los índices establecidos en la presente tesis con el propósito de calcular el nivel de sostenibilidad energética. Estos coeficientes de peso serán expresados de la siguiente forma:

$$\sigma_a = \left(\frac{B_a^*}{B_T^*} \right)_{s=\text{var}} \quad (2.18)$$

donde

σ_a , coeficiente correspondiente a cada uno de los índices (x), adimensional

B_a^* , costo exergético asociado al índice (a), en (PJ)

Capítulo 2. Procedimiento para alcanzar la Sostenibilidad energética.

B_T^* , costo exergético total, en (PJ)

s, sector de la economía.

Utilizando este método y sustituyendo la ecuación 2.18 en 2.17, se puede realizar la integración de los índices anteriores de la siguiente manera (Ocaña, 2006b).

$$I_{SE} = \sum_{s=1}^q \left(\frac{B_{\alpha}^* \alpha_s + B_{\beta}^* \beta_s + B_{\gamma}^* \gamma_s + B_{\lambda}^* \lambda_s}{B_{TS}^*} \right) \quad (2.19)$$

donde

B_{α}^* , costo exergético relacionado con el nivel de sostenibilidad (PJ)

B_{η}^* , costo exergético relacionado con la eficiencia de los sistemas de transformación (PJ)

B_{β}^* , costo exergético relacionado con la limpieza de la exergía consumida (PJ)

B_{γ}^* , costo exergético relacionado con la auto satisfacción exergética del sistema (PJ)

B_T^* , costo exergético total (PJ)

s, subsistema.

Para el presente trabajo se han tomado como subsistemas los sectores de la economía.

Para el cálculo del costo exergético total B_T^* , se usará la siguiente expresión:

$$B_T^* = \sum_{s=1}^1 \left(B_{\alpha}^* + B_{\beta}^* + B_{\gamma}^* + B_{\lambda}^* \right) \quad (2.20)$$

Cada uno de los costos exergéticos relacionados con los factores, anteriormente tratados, necesitan de un procedimiento que permita su cálculo. Seguidamente se explican los procedimientos de cálculo propuestos en la presente investigación.

2.4.2 Costo exergético asociado al Indicador de renovabilidad de la exergía consumida.

Capítulo 2. Procedimiento para alcanzar la Sostenibilidad energética.

A la hora de definir en un sistema la influencia del nivel de renovabilidad de la exergía consumida sobre el costo exergético total, resulta imprescindible considerar el carácter no acumulativo o de baja capacidad de acumulación que presentan las energías renovables. Por esta razón, es posible plantear que la exergía renovable disponible o que entra al sistema y que no es aprovechada, se pierde formando parte del costo exergético del sistema.

Es posible pensar que al provenir estos tipos de energía de una fuente con durabilidad infinita, el Sol, carezca de importancia el no uso de estas cantidades de energía; pero esa idea debe ser sopesada ya que el uso de las fuentes renovables de energía podría evitar el consumo de importantes cantidades de portadores de energía no renovables, los que además, poseen un valor de uso más allá de la producción energética. Al ser consideradas estas energías no aprovechadas como un costo de oportunidad en que incurre el sistema, se estimulará su uso en bien de la utilización más racional de los recursos no renovables.

Por lo anterior, el costo energético vinculado con el Indicador de Renovabilidad será calculado mediante la ecuación (2.21) que es mostrada seguidamente (Ocaña, 2006b).

$$B_{\alpha}^* = \sum_p \sum_i (B_{rd} - B_{rc})_{i,p} \quad (2.21)$$

donde

B_{α}^* , Costo exergético asociado al índice de renovabilidad de la exergía consumida, en (PJ)

B_{rd} , Exergía renovable disponible, en (PJ)

B_{rc} , Exergía renovable consumida, en (PJ)

La ecuación número 2.21 permite el cálculo de la parte de la exergía proveniente de las energías renovables que no es aprovechada, dándole un carácter de costo evitable.

2.4.3 Costo exergético asociado al Indicador de eficiencia de la tecnología.

Capítulo 2. Procedimiento para alcanzar la Sostenibilidad energética.

El costo exergético de las tecnologías de transformación energética se tendrá en cuenta en el cálculo del peso del indicador λ , siendo calculado para cada una de las tecnologías de transformación existentes en el sistema. Dicho costo será calculado mediante la ecuación 2.22 la que se muestra seguidamente.

$$B_{\lambda}^* = \sum_i B_i \frac{1}{\psi_i} \quad (2.22)$$

donde

B_{λ}^* , Costo exergético asociado al índice de eficiencia de la tecnología. (PJ)

B_i , Exergía producida en la tecnología (i), en (PJ)

ψ_i , Eficiencia exergética de la Tecnología (i), en (PJ)

La ecuación anterior muestra la manera de realizar el cálculo del costo exergético B_{λ}^* asociado a la eficiencia de las tecnologías, el mismo muestra la relación de este costo con la exergía producida por cada una de las tecnologías y el costo exergético unitario expresado por $\left(\frac{1}{\psi_i}\right)$. Además, es necesario destacar que estos costos pueden producirse de manera directa en el sistema o de manera indirecta, o sea, en otro sistema a causa del consumo de cantidades de exergía importadas.

2.4.4 Costo exergético asociado al Indicador de limpieza de la energía consumida.

Los costos relacionados con la contaminación ambiental pueden ser divididos en dos grupos, los evitables y los no evitables (Martínez, 1992). La contaminación evitable es aquella para la cual existen tecnologías que permiten la eliminación de dichas sustancias contaminantes, ya sea para impedir que las sustancias contaminantes lleguen al medio y afecten la calidad de algún recurso o para restaurar su calidad. Para este caso, resulta fácil calcular la exergía consumida en el proceso de eliminación de las sustancias contaminantes pudiendo incluirse en el consumo exergético total (Ocaña, 2002a).

Para el caso de las emisiones contaminantes no evitables, que son aquellas que irremediamente llegarán al medio, es bastante complejo su cálculo; Aún cuando existe una relación entre la exergía y el

impacto o daño ambiental de las sustancias contaminantes no se han encontrado trabajos donde este aspecto se demuestra

Al analizar el costo exergético asociado a las emisiones de sustancias tóxicas producidas en un proceso de transformación energética, es necesario considerar el costo exergético de abatimiento en el caso de que se realice la eliminación parcial o total de las sustancias consideradas como contaminantes, que se generan en los procesos de transformación energética; además del costo relacionado con los impactos que sobre el medioambiente estas sustancias provocan(Ocaña, 2006b).

$$B_{\beta}^* = \sum_p \sum_i \sum_k (B_{Ab}^* + B_{imp}^*)_{p,i,k} \quad (2.23)$$

Donde,

B_{β}^* , Costo exergético asociado al índice de limpieza de la energía consumida, en (PJ)

B_{Ab}^* , Costo exergético de Abatimiento de las sustancias contaminantes, en (PJ). Tomado de (Botero, 2000)

B_{imp}^* , Costo exergético de los impactos ambientales producidos por las sustancias contaminantes, en (PJ).

p, Portador de energía.

i, Tecnología utilizada en la transformación del portador (p).

k, sustancia contaminante emitida en el proceso de transformación (i).

2.4.4.1 Cálculo del costo exergético de abatimiento (B_{Ab}).

Con anterioridad, se han desarrollado estudios sobre el consumo de exergía, en procesos de eliminación de sustancias contaminantes contenidas en los gases, producidos durante la combustión, en especial los desarrollados por Botero y Valero (Botero, 2000) y Dewulf (Dewulf, 2001). Estos autores han realizado el análisis exergético de varios sistemas para la eliminación de gases contaminantes.

Capítulo 2. Procedimiento para alcanzar la Sostenibilidad energética.

En cuanto al término Costo exergético de Abatimiento (B_{Ab}^*) es necesario tenerlo en cuenta para la eliminación parcial o total de las sustancias consideradas contaminantes. Este término ha sido bien planteado por Botero, 2000 como “aquella cantidad de exergía que es necesario utilizar para abatir las emisiones de un determinado contaminante, hasta los niveles que lo hacen legalmente inocuo para el medio ambiente”.

En la presente investigación, se tendrá en cuenta el nivel de abatimiento alcanzable para los principales contaminantes generados en la transformación de combustible fósiles como son CO₂, SO₂, NO_x y partículas, contando con la mejor tecnología disponible. Los (B_{Ab}^*) unitarios calculados para cada uno de los contaminantes, se resumen a continuación:

$$B_{Ab\ CO_2}^* = 1,450 \text{ MJ/ton}$$

$$B_{Ab\ SO_x}^* = 5,710 \text{ MJ/ton}$$

$$B_{Ab\ NO_x}^* = 7,750 \text{ MJ/ton}$$

$$B_{Ab\ MP}^* = 260 \text{ MJ/ton}$$

Usando estos valores, se calcularán los costos exergéticos para el abatimiento de las emisiones potenciales asociadas a las transformaciones energéticas.

2.4.4.2 Cálculo del costo exergético asociado a los impactos ambientales (B_k)

La relación que existe entre la exergía de las emisiones contaminantes y el daño medioambiental es reconocida por varios investigadores, por ejemplo, Reistad, G.M., (Reistad, 1970) quien consideró el valor económico de la exergía en los combustibles y desarrolló una tasa de contaminación del aire, para un combustible, en el que se estimó como el costo necesario para quitar el contaminante o el costo a la sociedad, en forma de un impuesto que debe cobrarse si los contaminantes no son eliminados de los desechos.

Otros autores han tenido en cuenta los costos asociados con los flujos de sustancias contaminantes, dentro de los que se encuentran (Frangopoulos, 1992), (Curti, 2000) y más recientemente (Lazzaretto, 2004) quienes los plantean como costos medioambientales y sociales de las emisiones contaminantes no deseadas, incluyendo además, los asociados a su enriquecimiento y transporte.

Capítulo 2. Procedimiento para alcanzar la Sostenibilidad energética.

Una variante del acercamiento del análisis económico – ambiental es usada por Borchiellini R. (Borchiellini, 1999), donde la función objetivo considera un impuesto de carbono para la producción de CO₂ como término de penalización, incluyendo además, los costos relacionados con los procesos de abatimiento de las sustancias contaminantes, en especial el CO₂ enriqueciendo posteriormente estos aspectos con un análisis de segunda ley (Borchiellini, 2000).

Para determinar el costo exergético utilizando las tasas impuestas por los gobiernos a la emisión de sustancias contaminantes en la presente investigación se propone la ecuación (2.24), la que expresa la sumatoria de la cantidad de exergía por portador asociada con al costo monetario que resulta necesario pagar por la emisión de sustancias contaminantes a la atmósfera la misma es la siguiente(Ocaña, 2006b):

$$B_{imp}^* = \sum_p \left(\frac{\sum_{k=1}^m Z_k (w_{k,p} - Ab_{k,p})}{Z_p} e_p \right) \quad (2.24)$$

Donde,

Z_k , tasa de impuesto por la emisión del contaminante (k) por la transformación del portador energético (p), en (\$/kg) de contaminante (k) emitido.

\dot{m}_k , cantidad de contaminante (k) emitido, en (kg).

Z_p , costo del portador (p) utilizado en la conversión, en (\$/kg).

e_p , exergía específica del portador (p) en (PJ/kg).

Esta expresión expresa el equivalente a la tasa impuesta al sistema, en unidades de exergía del portador consumido para la producción de exergía. Es necesario destacar, la importancia de tener en cuenta, tanto las emisiones directas o indirectas realizadas por el consumo de energía.

En el presente trabajo serán utilizadas las tasas reportadas por Curti (Curti, 2000) quien asigna los valores siguientes:

$$Z_{CO_2} = 0,021 \text{ \$/kg CO}_2$$

$$Z_{NO_x} = 6,853 \text{ \$/kgNO}_x$$

$$Z_{SO_x} = 3,832 \text{ \$/kgSO}_x$$

2.4.5 Costo exergético asociado al Indicador de auto satisfacción del consumo de exergía en el sistema.

Para el cálculo del costo exergético asociado al índice de auto satisfacción del consumo de exergía en el sistema, resulta necesario realizar un análisis.

Cuando se realiza la importación de portadores energéticos, necesariamente tiene que consumirse cierta cantidad de exergía asociada al consumo de los equipos automotores o de bombeo, según el medio utilizado en su transportación, esta exergía debe ser contabilizada como un costo. Para los equipos de bombeo, en el caso de que utilizaran electricidad, y en el caso de la transmisión de la energía eléctrica sería necesario tener en cuenta las pérdidas producidas durante estos procesos.

El costo relacionado a γ será calculado de la siguiente forma (Ocaña, 2006b):

$$B_{\gamma}^* = \sum_p (B_{et} + B_{eb}) + B_{te} \quad (2.25)$$

Donde,

B_{γ}^* , Costo exergético asociado al índice de auto satisfacción del consumo de exergía, en (PJ)

B_{te} , exergía consumida por los equipos de transporte, en (PJ)

B_{eb} , exergía consumida por los equipos de bombeo, en (PJ)

B_{et} , exergía perdida en la transmisión eléctrica, en (PJ)

En el caso de los vehículos automotores, este costo estará relacionado con el índice de consumo medio asociado al parque de equipos automotores que realizan el transporte del portador (p). Los índices de consumo, aunque no se publiquen en las estadísticas, son conocidos por las empresas que se dedican al

Capítulo 2. Procedimiento para alcanzar la Sostenibilidad energética.

transporte de portadores de energía, ya que forman parte de sus costos de operación. Este costo exergético puede ser calculado mediante la siguiente ecuación:

$$B_{et} = \frac{\rho_{pt} M_p e_{pt}}{10^{12} I_c} \quad (2.26)$$

Donde,

B_{et} , exergía consumida por los equipos de transporte en (PJ)

ρ_{pt} , densidad del portador consumido para la transportación, en (kg/l)

M_p , cantidad de portador importado, en (t)

e_{pt} , exergía específica del portador consumido para la transportación (kJ/kg)

I_c , índice de consumo del portador (p), de la tecnología de transportación (i), en (t/l)

La exergía consumida durante el bombeo será calculada a partir de los consumos de la energía eléctrica en (kWh), lo que podría transformarse en (PJ) y obtenida de las estadísticas recopiladas por las empresas que se relacionan a la explotación de gasoductos y oleoductos.

Las pérdidas relacionadas con la transmisión eléctrica serán calculadas mediante el producto del inverso de la eficiencia de transmisión por el consumo de energía eléctrica del sistema en la unidad de tiempo establecida.

$$B_{te} = \frac{1}{\eta_{te}} B_e \quad (2.27)$$

Donde,

η_{te} , eficiencia de la transmisión eléctrica, adimensional

B_e , consumo de energía eléctrica del sistema

Sustituyendo (21) y (22) en (20) se tiene que el costo exergético asociado al índice de auto satisfacción del consumo de exergía B_γ^* tomará la siguiente forma:

$$B_\gamma^* = \sum_p \left(\frac{\rho_{pt} M_p e_{pt}}{I_c} + B_{eb} \right) + \frac{1}{\eta_t} B_e \quad (2.28)$$

2.5 Formulación del Ambiente de Referencia (AR).

El análisis exergético permite la evaluación de los flujos de portadores energético en un sistema, pero para ello, es preciso definir un Ambiente de Referencia (AR); así como los valores de las exergías de los flujos que intervienen en el mismo, el criterio de Szargut es el que proporciona mayor acercamiento al medio ambiente natural para los proceso de transformación energética y será utilizado para definir el AR en el cálculo de las exergías específicas de las sustancias que componen los flujos de los proceso que tienen lugar en los procesos que se analizan.

En la presente investigación se propone utilizar dadas las características químicas y físicas de las sustancias que se procesan, se seleccionaron las siguientes para caracterizar el AR, como las formas químicamente más estables en el ambiente natural y sus fases:

Tabla 2. 1. Especies estables en el medio ambiente.

Fases	Sustancia del M.A
Líquida	H ₂ O (l)
Gaseosa	Aire atmosférico saturado

Cada una de estas sustancias de referencia, deben caracterizar a un elemento químico, como su forma estable en el ambiente natural. Para el AR que se define, la tabla 2.4 muestra la caracterización:

Tabla 2. 2. Relación Sustancia – Elemento Químico.

Sustancia del M.A	Configuración estable.
H ₂ O (l)	H ₂
O ₂ (aire sat.)	O ₂
N ₂ (aire sat.)	N ₂
CO ₂ (aire sat.)	C

Para caracterizar el AR desde el punto de vista termodinámico, se definió una presión atmosférica de 0,1 MPa y una temperatura ambiental de referencia de 25 °C (298 °K), como los parámetros que caracterizan el equilibrio térmico y mecánico del medio ambiente.

2.6 Conclusiones parciales.

Para alcanzar la sostenibilidad energética resulta necesario tener en cuenta cuatro indicadores, renovabilidad energética (α), eficiencia exergética de los sistemas de transformación (η), limpieza de la exergía consumida (β) y auto satisfacción exergética del sistema (γ); estos agrupados de forma armónica, mediante la fracción de costo exergético asociado a cada uno de ellos, permiten evaluar la influencia que sobre la sostenibilidad energética de un sistema dado tienen las fuentes de energía utilizadas, la eficiencia de transformación, el nivel de impacto sobre el medioambiente asociados a las tecnologías de transformación energéticas y la capacidad de auto sostenimiento energético.

Como parte del procedimiento para el cálculo del Índice de Sostenibilidad Energético Ambiental los principales aportes se encuentran en la definición del propio índice y en la definición del indicador de Limpieza de la Exergía Consumida (β), no reportados en la literatura consultada.

El procedimiento para la determinación del Índice de Sostenibilidad Energético Ambiental, constituye una solución al problema científico planteado, donde se pueden señalar como aspectos novedosos las ecuaciones, desarrolladas por primera vez, que permiten el cálculo del nivel de sostenibilidad energética y los factores sobre los que se debe actuar para mejorar dicha sostenibilidad.

Mediante el procedimiento establecido se logra una herramienta capaz de cuantificar el nivel de Sostenibilidad Energético Ambiental, permitiendo la realización de comparaciones espacio – temporales entre diferentes sistemas, mostrando los aspectos que de manera favorable o desfavorable provocan los resultados obtenidos durante el análisis.

Es presentado un procedimiento mediante el cual puede ser definida la matriz energética que garantice los mayores valores de sostenibilidad energético ambiental para un sistema dado, atendiendo a la disponibilidad de recursos energéticos, consumo energético del sistema y parámetros económicos de las tecnologías disponibles.

Resulta necesario contar con una buena fuente de datos que permitan una caracterización adecuada del sistema que se analice.

Capítulo 3. Aplicación del Procedimiento Propuesto. Resultados y Discusión.

Como se ha expuesto, el desarrollo sostenible constituye una vía para el uso racional de los recursos, teniendo en cuenta que el impacto al medio ambiente resulte el mínimo posible. Debido a que la energía forma parte indisoluble de la humanidad es imprescindible que la sociedad alcance primeramente la sostenibilidad energética, esta resulta muy difícil de alcanzar por lo que se necesitan herramientas que permitan proyectar y evaluar los pasos para su logro.

Con vista a poder evaluar de manera integral los procesos encaminados al alcance del desarrollo sostenible ha sido planteado un procedimiento capaz de proyectar y evaluar estrategias para el logro de la sostenibilidad energética, el que se encuentra dividido en dos partes: la primera se centra en la evaluación del estado de sostenibilidad energética de sistemas sociales y la segunda en la determinación de la matriz energética que garantiza el mayor nivel de la misma.

De acuerdo a lo anterior es objetivo de este capítulo evaluar el comportamiento del procedimiento propuesto para el caso de sistemas sociales concretos, con la intención de demostrar sus potencialidades, además se busca establecer la forma más adecuada para la proyección de estrategias energéticas, en virtud de potenciar la sostenibilidad energética.

3.1 Descripción de los sistemas utilizados durante la Aplicación del procedimiento propuesto.

Los sistemas seleccionados para realizar la Aplicación del modelo han sido escogidos fundamentalmente por su disponibilidad de datos de producción, importación y consumo de energía tanto primaria como secundaria además, por su capacidad para la toma de decisiones en materia de planeación energética.

La provincia de Villa Clara, Cuba, es uno de los sistemas a los cuales fue aplicado el procedimiento propuesto, la misma se encuentra ubicada en la región central del país con una superficie de 7 943 km² y cuenta con una población de 836 200 habitantes. Esta provincia es eminentemente agrícola siendo el azúcar de caña su principal producción. La República de Cuba es el otro sistema utilizado en la

Capítulo 3. Aplicación del Procedimiento Propuesto. Resultados y Discusión.

evaluación ya que aunque posee estatus de país, comparándolo con otros muchos países en cuanto a extensión y población, bien podría ser subsistema de los mismos, o una provincia aislada del sistema electro energético nacional. En el caso del sistema Cuba resulta una isla situada en el trópico, con una extensión de 110 860 km² y una población de 11 250 979 habitantes (MEPLAN, 2005).

Estos sistemas han sido divididos en una serie de sectores para facilitar la identificación de los factores que influyen sobre los resultados obtenidos durante el desarrollo del estudio. En el caso de la selección de los sectores, fueron seleccionados principalmente teniendo en cuenta la disponibilidad de datos existentes en dichos sistemas, el tipo y número de los sectores pueden variar según sea el caso concreto. Los sectores en que se ha dividido el sistema son los siguientes: Industrial, Construcción, Transporte, Agrícola, Comercio, Población y Otros.

En la figura 3.1 se muestra el diagrama de flujo energético de un sistema general para la determinación del nivel de sostenibilidad energética mediante el cálculo del Índice de Sostenibilidad Energético Ambiental (Ocaña, 2006b). En dicha figura se muestran la procedencia de los portadores energéticos que entran al sistema, las salidas y la generación de contaminantes.

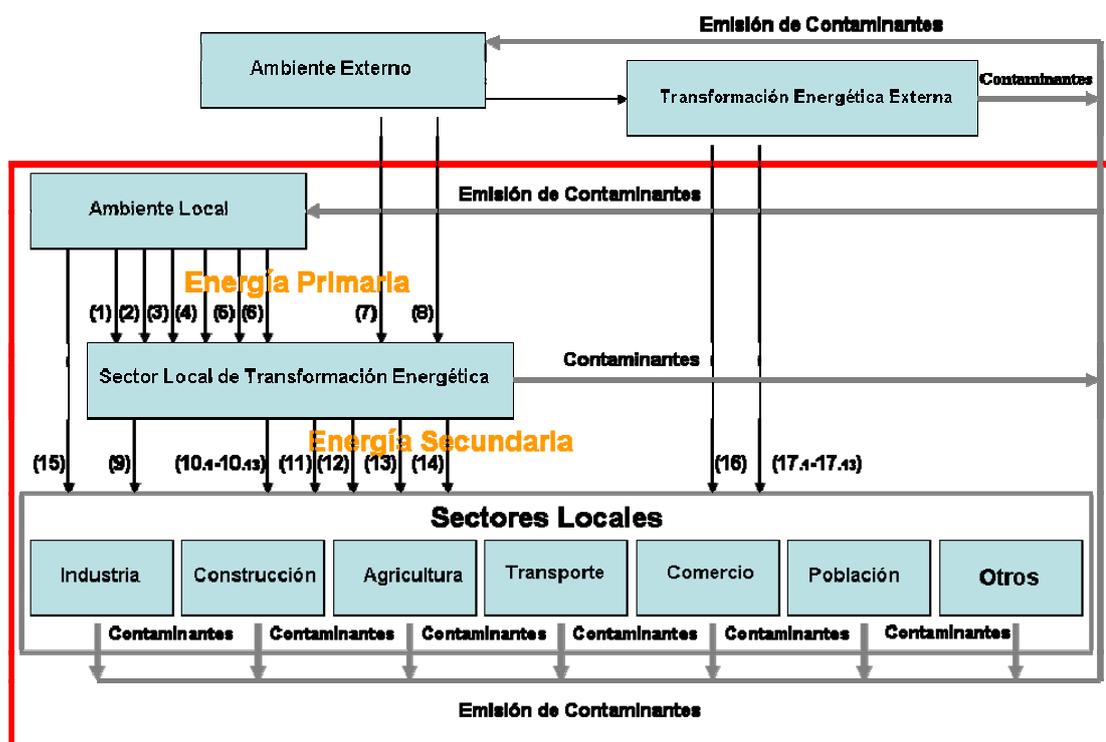


Fig. 3. 1. Adaptación del diagrama de flujo energético para el caso del sistema Cuba.(Ocaña, 2006b)

A continuación se muestran los portadores tenidos en cuenta para la aplicación del procedimiento.

Portadores de energía primaria producida en Cuba		Energía secundaria producida en Cuba	
No	Portador	No	Portador
1	Crudo	9	Coque
2	Gas Natural	10 ₁₋₁₃	Derivados del petróleo
3	Hidroenergía	11	Electricidad
4	Leña	12	Carbón vegetal
5	Productos de la caña de azúcar	13	Alcohol
6	Bagazo	14	GLP
		15	Crudo **
Energía primaria importada en Cuba		Energía secundaria importada en Cuba	
No	Material	No	Material
7	Carbón mineral*	16	Coque
8	Crudo	17 ₁₋₁₃	Derivados del petróleo

3.2 Análisis de las fuentes de datos utilizadas para la aplicación del procedimiento propuesto.

Para la aplicación del procedimiento propuesto es necesario contar con una serie de datos que permitirán tanto la caracterización del sistema como los cálculos que forman parte de dicho procedimiento. Estos datos se encuentran divididos en tres grupos, el primero contiene las propiedades físico – químicas de los combustibles, el segundo los factores de emisión de contaminantes y el tercero los flujos de portadores energéticos. Seguidamente se analiza cada uno de estos grupos.

3.2.1 Fuente de datos relacionados con las propiedades físico – químicas de los combustible.

Las propiedades físico-químicas fueron tomadas del estudio presentado por la U.S. Environmental Protection Agency, 1998. Dichos datos se encuentran presentados en el anexo 1, donde se recopilan las características de los combustibles sólidos, líquidos y los gaseosos. Las características que son mostradas son:

Composición elemental, porcentaje de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre, humedad y ceniza para el caso de los combustibles sólidos y líquidos; para el caso de los gaseosos las fracciones de cada uno de los gases que componen la mezcla gaseosa.

Poder Calórico Superior kJ/kg

Densidad

Capítulo 3. Aplicación del Procedimiento Propuesto. Resultados y Discusión.

Los datos se encuentran trabajados y adecuados teniendo en cuenta las unidades con las que se ha desarrollado el procedimiento propuesto los que son mostrados en los anexos, siendo ordenados convenientemente para que formen parte de un software que sirva como herramienta en la manipulación de la gran cantidad de datos.

3.2.2 Fuente de datos relacionados con los Factores de Emisión de Contaminantes.

Los datos de los factores de emisión de contaminantes han sido tomados del EP-42 Emission Factors, U.S. Environmental Protection Agency 1998. Estos datos igualmente se encuentran presentados en las unidades correspondientes a lo requerido por el procedimiento propuesto. Los factores de emisión que se muestran son los siguientes: CO₂, NO_x, SO_x y Partículas (MP).

En el caso de la determinación de la absorción de sustancias perjudiciales al medio ambiente, se plantea en el anuario estadístico de la República de Cuba para el año 2005 (MEPLAN, 2005) muestra la diferencia entre emisión y absorción de tipo natural para el CO₂, pudiendo ser calculado como 0.77% de absorción. Al analizar el resto de las sustancias contaminantes, es asumido que no se absorbe nada del total de emisiones.

3.2.3 Fuente de datos relacionados con los Flujos de Portadores Energéticos.

En el caso de los datos de los flujos de portadores energéticos fue utilizado el Anuario estadístico de la República de Cuba del año 2005. En dicho anexo se presenta una selección de los principales indicadores que caracterizan la economía energética en Cuba. En el anexo se incluyen indicadores relacionados con la producción nacional, tanto de fuentes primarias como secundarias de energía, importación y el consumo.

La fuente fundamental de las estadísticas de este anuario estadístico son las informaciones captadas en el Sistema de Información Estadística Nacional (SIE-N) en la parte correspondiente a Energía y Combustibles e Industria, así como otras que se obtienen a partir de las estadísticas complementarias de los Organismos de la Administración Central del Estado, en particular del Ministerio de la industria Básica (MINBAS). Serán utilizadas las estadísticas correspondientes a los años comprendidos entre 1996 y 2004.

Capítulo 3. Aplicación del Procedimiento Propuesto. Resultados y Discusión.

Del anuario han sido tomados los datos referidos a la Producción nacional de energía primaria, la que se refiere al proceso de extracción, captación o producción (siempre que no conlleve transformaciones energéticas) de portadores energéticos naturales (primarios), independientemente de sus características. Los portadores energéticos naturales son aquellos “provistos por la naturaleza, ya sea en forma directa, como la energía hidráulica, eólica y solar, o después de atravesar un proceso minero, como el petróleo, el gas natural y el carbón mineral, o a través de la fotosíntesis, como es el caso de la leña y los otros combustibles vegetales y de origen animal (MEPLAN, 2005).

Los portadores naturales que se producen en Cuba y de los cuales se dispone de información estadística recopilada y sistemática son:

Petróleo	Leña
Gas natural	Productos de caña (incluyendo bagazo)
Hidroenergía	

En el caso particular de la Hidroenergía, sus niveles de producción están estimados a partir de la energía eléctrica producida por las centrales hidroeléctricas del país, operadas por la Unión Eléctrica y el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, asumiendo una eficiencia promedio en planta del 80 %.

Con relación a la leña, en ella se incluyen solamente los flujos comerciales de este portador. También fueron tomados los datos de producción de energía secundaria, siendo estos los productos resultantes de las transformaciones o elaboración a partir de portadores energéticos naturales (o en determinados casos a partir de otro portador ya elaborado) se denominan portadores elaborados (o secundarios). Son portadores energéticos elaborados la electricidad, toda la amplia gama de derivados del petróleo, el carbón vegetal, el alcohol desnaturalizado y el gas manufacturado (o gas de ciudad).

El grupo de los derivados del petróleo incluye una amplia variedad de productos energéticos útiles que se obtienen a partir del procesamiento del petróleo en las refinerías, entre los cuales se encuentran las gasolinas, los turbocombustibles y los combustibles diesel (gasóleos) de extraordinaria demanda universal.

Los principales productos que se obtienen en Cuba de la refinación del petróleo son los siguientes:

Capítulo 3. Aplicación del Procedimiento Propuesto. Resultados y Discusión.

Gas licuado (GLP)	Fuel oil
Gasolinas y nafta (distintos tipos)	Coque de petróleo y gas de refinería
Kerosene	Asfaltos
Turbocombustible	Solventes
Diesel oil	

La mayor parte de los lubricantes que se obtienen en Cuba se producen a partir del procesamiento de aceites básicos importados y no del petróleo como tal. En los últimos años se han ampliado algunas capacidades con el objetivo de obtener determinados cortes de aceites básicos a partir de la refinación del petróleo. Para el caso de la aplicación del procedimiento propuesto se considera que al final de la vida útil de los lubricantes son mezclados con el fuel oil y quemados en las calderas, por esta razón se incluyen en el presente análisis.

Los datos tomados como consumo son los que se refieren al consumo total (o consumo bruto) con independencia del uso al cual se destinan; es decir, están incluidos las cantidades utilizadas propiamente para obtener energía (uso energético final), las utilizadas para ser transformadas en otros combustibles (uso en transformación) y las que se emplean con fines no energéticos.

Dentro de los consumos no están incluidos las pérdidas en transportación y almacenaje ni los ajustes estadísticos del balance. Los consumos consideran todos los sectores de la economía nacional incluyendo el privado y los hogares. Se incluye también dentro del consumo lo adquirido por naves y aeronaves cubanas en tránsito internacional. Se ha incorporado a los consumos de Fuel Oil, la parte correspondiente al Petróleo Crudo Nacional, que se utiliza directamente en sustitución del Fuel Oil

Los datos de consumo de energía eléctrica se refieren al consumo de electricidad registrado por todos los sectores de la economía (incluyendo privado y hogares) y con independencia de la fuente de origen (servicio público o auto productores). Incluye también el insumo en generación y las pérdidas. Los ajustes estadísticos del balance están incluidos en el sector “otros”, por lo que, bajo las especificaciones anteriores, el consumo total resulta igual a la generación bruta total del país.

Capítulo 3. Aplicación del Procedimiento Propuesto. Resultados y Discusión.

Para el caso de la energía eólica, solar térmica y solar fotovoltaica los datos de producción han sido tomados de los reportes publicados por CUBAENERGÍA, Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía, Cuba (CUBAENERGÍA, 2002).

3.2.4 Fuente de datos relacionados con los costos exergéticos asociados con los Indicadores de sostenibilidad.

3.2.4.1 Costo exergético asociado con el Indicador de renovabilidad.

A la hora de considerar los elementos que componen el potencial de energía renovable de un sistema, deben contarse con una Evaluación del Potencial Energético del mismo. Dicha evaluación detectará los recursos energéticos renovables con que cuenta dicho sistema y la magnitud del mismo.

En el caso de Cuba se cuenta con una serie de recursos energéticos renovables, los que se relacionan a continuación: leña, bagazo, solar (radiación directa), eólica e hidráulica.

En el caso de la leña, se ha estimado que posee un potencial explotable con fin energético, sin peligro a romper el equilibrio ecológico, de 3.5 millones de metros cúbicos al año, tomando como valor de densidad media 561 kg/m^3 (EPA) se tiene un potencial de $19.6 \cdot 10^2 \text{ kt}$.

Para el caso del bagazo fue analizado el Anuario Estadístico de la República de Cuba, en el mismo se muestra que en los años 1970 con 23 274.1 kt, 1985 con 18 315 kt y 1990 con 23 261 kt se obtuvieron las mayores producciones. Las zafas de 1970 y de 1990 tuvieron características atípicas por lo que se toma la producción del año 1985 como valor para el cálculo. Llevando esta cantidad a unidades energéticas se obtiene 170.71 PJ.

Cuando se analiza el potencial de energía solar, incluyendo la solar térmica y la solar fotovoltaica, según (CUBAENERGÍA, 2002), el valor medio de potencial cubano es de 5 kWh/m^2 al día. Al analizar la superficie que realmente puede ser utilizada, se reconoce la necesidad de proteger los mejores suelos para la producción de alimentos y soporte para la biosfera, en el caso de los suelos con menor calidad por lo regular se favorecen para la construcción, por esta razón se ha estimado que el área fundamental que puede ser utilizada para el aprovechamiento de la energía solar directa es el área existente en el sistema que se estudie.

Capítulo 3. Aplicación del Procedimiento Propuesto. Resultados y Discusión.

Para el caso de Cuba se estima 1 800 000 viviendas en las que podría aprovecharse solo 40 m² de superficie de las mismas (MEPLAN, 2005), por esta razón el valor del potencial de energía solar directa sería de 1.296 PJ.

El potencial eólico del país no ha sido aún lo suficientemente estudiado desde el punto de vista de su posible aprovechamiento mediante aerogeneradores. Cuba cuenta con un parque eólico con una potencia instalada de 450 kW y existe la posibilidad de llegar a 400 MW según los potenciales existentes (CUBAENERGÍA, 2002). De instalar dicha potencia, el país podría disponer de 560640.00 MWh al año, equivalente a 2.02 PJ de energía eólica.

La hidroenergía, por su aporte energético, estabilidad, autonomía, ventajas operacionales y dispersión territorial, es una de las fuentes renovables de energía de gran importancia en Cuba. El potencial hidroenergético estimado es de unos 650 MW, con una generación anual de unos 1 300 GWh. que equivalen a 4.68 PJ (MEPLAN, 2005).

3.2.4.2 Costo exergético asociado con el Indicador de Limpieza de la Exergía Consumida.

Para la determinación del costo asociado a la limpieza de la exergía consumida, solo faltan los valores de las externalidades vinculadas a las emisiones contaminantes y el costo monetario de los portadores energéticos.

En el caso de las externalidades aunque en Cuba existen trabajos en los que se calculan para las condiciones cubanas, estas no pueden ser usadas como patrón de comparación. Por esto será tomada la media europea propuesta por el proyecto ExternE (European Commission., 1997) la que se muestra en la tabla 3. 1.

Tabla 3. 1. Costo del daño ambiental por contaminante (€/t)

Contaminante	Costo del daño (€/t)
SO₂	1 027-15 300
NO_x	852-18 000
Material Particulado	1 340-57 000
CO₂	18-46

Los valores utilizados corresponden a los menores del rango planteado anteriormente. Esto se debe a que pertenecen a países desarrollados con niveles de vida muy elevados y el usar costos medios sería

Capítulo 3. Aplicación del Procedimiento Propuesto. Resultados y Discusión.

incorrecto al comparar con países más pobres. Los valores que serán usados se muestran en la siguiente tabla 3. 2.

Tabla 3. 2. Valor elegido para el Costo del daño ambiental por contaminante (€/t).

Contaminante	Costo del daño (€/t)
SO₂	1 027
NO_x	852
Material Particulado	1 340
CO₂	18-46

En el caso de los costos de los combustibles utilizados se muestran en la siguiente tabla 3.3.

Tabla 3. 3. Precios de los combustibles

Portador	Precio \$/t
Gas licuado del petróleo, GLP	600
Gasolina Motor	924
Queroseno	250
Gas Oil	560
Fuel Oil	450
Coque	31.65
Nafta Industrial	240
Aceites Lubricantes y Grasas (producto final)	567
Solventes	570
Gasolina Aviación	325
Turbo combustible	400
Carbón bituminoso	32.96
Carbón antracita	36.90
Coque de carbón	36.90
Bagazo	11.00
Productos de la caña	11.00
Leña	3.00
Carbón vegetal	100
Gas Natural	100
Gas licuado del petróleo	100
Etanol desnaturalizado	38
Crudo	410.74
Electricidad (tarifa media de la electricidad en Cuba)	9.00E+05
Hydroenergía(tarifa media de la electricidad en Cuba)	9.00E+05
Energía eólica(tarifa media de la electricidad en Cuba)	9.00E+05
Energía Solar Térmica	0
Energía Solar fotovoltaica (tarifa media de la electricidad en Cuba)	0

3.2.4.3 Costo exergético asociado con el Indicador de eficiencia energética

El cálculo del costo asociado a la eficiencia exergética se realizó teniendo en cuenta cada una de las tecnologías de transformación utilizadas en el sistema, para ello fue utilizada la ecuación 2.24. Los valores de eficiencia energética fueron tomados de los resultados parciales para determinación del Índice de eficiencia energética.

Estos costos, en el caso de los asociados al índice de renovabilidad y al índice de limpieza de la exergía consumida, se calcularon para cada uno de los sectores de la economía; no siendo así para el caso de los relacionados con el índices de eficiencia exergética de los sistemas de transformación y el Índice de auto satisfacción exergética, debido a que son índices que se relacionan directamente con el sistema total.

3.2.4.4 Costo exergético asociado con el Indicador de auto satisfacción.

Para el cálculo del costo asociado al Indicador de auto satisfacción exergética, para los casos a los que le fue aplicado el procedimiento, se determinó que el aspecto primordial se encontraba relacionado con los costos de importación. Veloz M. plantea que al entrevistar a Humberto Betancourt, director de Planificación Estratégica de Cuba Petróleo (CUPET), este manifestó que Cuba compraba el crudo con 15% por encima del valor del precio en el mercado internacional (Veloz, 2002). Para la aplicación del procedimiento se determinó tomar el valor anterior como factor de pérdida por importación que al ser multiplicado por la cantidad total de exergía importada arrojará el costo exergético vinculado a la importación de portadores.

3.3 Resultados de la aplicación del procedimiento para la determinación del Índice energético ambiental.

En este epígrafe se realiza la aplicación del procedimiento a dos sistemas, primeramente a la provincia de Villa Clara para el año 2002 y posteriormente a la República de Cuba en el mismo año. Más adelante se aplica para los años comprendidos entre el 1996 y el 2001, lo que permite la realización de un análisis temporal del comportamiento de la sostenibilidad energético ambiental.

3.3.1 Aplicación del procedimiento de cálculo de la sostenibilidad energético ambiental para el caso de la Provincia de Villa Clara en el año 2002

En la aplicación del procedimiento a la provincia de Villa Clara se llegó a los resultados mostrados en la tabla (3.12), donde se observan los comportamientos de cada uno de los indicadores calculados para cada sector de la economía.

Tabla 3. 4. Comportamiento de los indicadores propuestos por sector de la economía de Villa Clara en el año 2002.

Indicador	Industria	Construcción	Agropecuario	Transporte
Alfa	0.766	0	0	0
Beta	0.194	0.082	0.097	0.089
Gamma	0.109	0	0.001	0
Lambda	0.255	0.255	0.255	0.255

Como se observa en la figura 3.1 el indicador de renovabilidad posee el mayor valor en el sector industria con 0.766, esto se debe al consumo de bagazo en la industria azucarera el que asciende a 1209.29kt equivalente a 11.32 PJ sin embargo, en el resto de los sectores dicho indicador alcanza valor cero ya que los mismos prácticamente no se consumen portadores renovables. Al analizar el resultado total del indicador se obtiene el valor mostrado en la tabla 3.5.

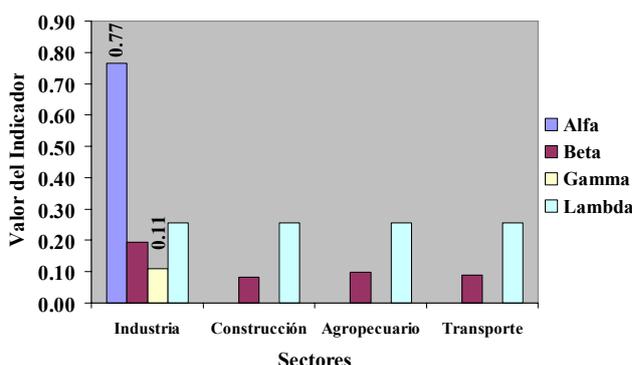


Fig. 3. 2. Comportamiento de los indicadores propuestos por sector de la economía de Villa Clara en el año 2002.

Tabla 3. 5. Resultados calculados de los indicadores propuestos para la economía de la provincia de Villa Clara en el año 2002.

Año	Alfa	Beta	Gamma	Lambda
2002	0.64	0.18	0.08	0.26

Capítulo 3. Aplicación del Procedimiento Propuesto. Resultados y Discusión.

En los resultados del Indicador de Limpieza de la exergía consumida puede verse como los valores son muy bajos, esto es debido a que no se produce el abatimiento de las sustancias contaminantes que son emitidas al ambiente. En dicha provincia, según el balance de carbono publicado en el anuario estadístico consultado (MEPLAN, 2005), plantea que se emite a la atmósfera el 7 % del total de CO₂ generado, el resto de las sustancias generadas en los procesos de combustión son emitidas directamente al medio. En el caso del sector industria es obtenido el mayor valor de β con 0.1939, lo que se debe fundamentalmente al uso del bagazo en la generación de vapor en los centrales azucareros.

Los resultados para el caso del índice de auto satisfacción de la exergía consumida se observa la correspondencia con la realidad de que la mayor parte de los portadores energéticos consumidos en la provincia son importados a la misma, solo el bagazo consumido en la industria y una pequeña parte de la energía eléctrica son producidos dentro de los límites del sistema.

El caso del indicador de eficiencia exergética depende fundamentalmente del sistema electroenergético nacional y será analizado en detalle más adelante. El valor calculado toma el valor de 0.255, siendo un valor bajo si se compara con las eficiencias de los sistemas modernos de transformación energética.

Los resultados del cálculo de los costos energéticos se muestran en la tabla 3.6, el Índice de Sostenibilidad Energético Ambiental alcanza el valor de 0.23.

Tabla 3. 6. Costo exergético asociado a cada indicador para la provincia de Villa Clara en el Año 2002.

	Alfa	Beta	Gamma	Lambda	Total
B* (PJ)	99.56	482.9	102.5	0.18	685.1
Isea	0.23				

3.3.2 Aplicación del procedimiento de cálculo de la sostenibilidad energético ambiental para el caso de la República de Cuba en el año 2002.

Al aplicar la metodología a la República de Cuba se obtuvieron los siguientes resultados de α por cada uno de los sectores de la economía los que son mostrados en la tabla 3.7. De los resultados obtenidos puede ser apreciado que el mayor valor de α se corresponde con el sector Industria, lo cual se encuentra en correspondencia con el consumo de exergía proveniente de fuentes renovables. Del total consumo de exergía renovable el consumo de bagazo asciende a 372.2 PJ siendo significativamente superior al resto de los portadores renovables consumidos como muestra la figura 3.2. El Indicador de renovabilidad de la exergía consumida en el sistema para el año 2002 es de 0.107, este valor expresa que el nivel de

Capítulo 3. Aplicación del Procedimiento Propuesto. Resultados y Discusión.

consumo de energía renovable se encuentra cerca de 11% del total de exergía consumida el que puede ser considerado bajo.

Tabla 3. 7. Valores de α por Sector de la economía Cubana para el año 2002

Sector	Consumo de Exergía no Renovable (PJ)	Consumo de Exergía Renovable (PJ)	Alfa
Industria	2578.6	375.1	0.13
Agricultura	2541.4	292.1	0.10
Construcción	2541.8	292.5	0.10
Transporte	2541.5	292.5	0.10
Comercio	2542.4	292.5	0.10
Población	2558.4	293.0	0.10

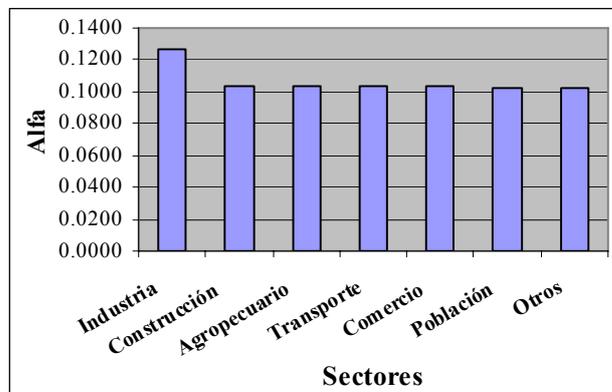


Fig. 3. 3. Comportamiento de Alpha en los sectores de la economía cubana en el 2002.

En el caso del indicador β queda evidenciada la influencia que posee el consumo de combustible fósil, sobre el mismo, mostrándose en los valores de los sectores de la construcción y el transporte en los que prácticamente toda la exergía que se consume proviene de portadores no renovables. En dichos sectores la totalidad de la exergía consumida proviene de portadores no renovables. Aunque en la situación particular de Cuba la absorción de las sustancias contaminantes se reduce solo al CO₂ y esto de manera natural, en los sectores anteriormente mencionados resulta en extremo difícil realizar la absorción de una parte de las sustancias contaminantes generadas en los mismos.

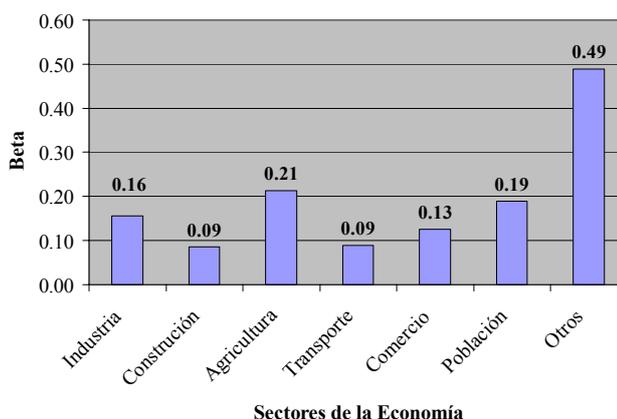


Fig. 3. 4. Comportamiento de β por sectores de la economía cubana en el 2002.

Capítulo 3. Aplicación del Procedimiento Propuesto. Resultados y Discusión.

El valor de Beta, calculado para el año 2002, es igual a 0.202 siendo igualmente bajo debido a la cantidad de combustible fósil consumido en Cuba en comparación con las energías renovables. Por otra parte los niveles de absorción de sustancias contaminantes resultan insuficientes, solo absorbiéndose parte del CO₂ resultante de las transformaciones energéticas, el resto de las sustancias contaminantes que son tenidas en cuenta en el presente trabajo son emitidas directamente al ambiente.

En el caso del Indicador de Auto Satisfacción de la Exergía Consumida pueden verse los resultados en la figura 3.5.

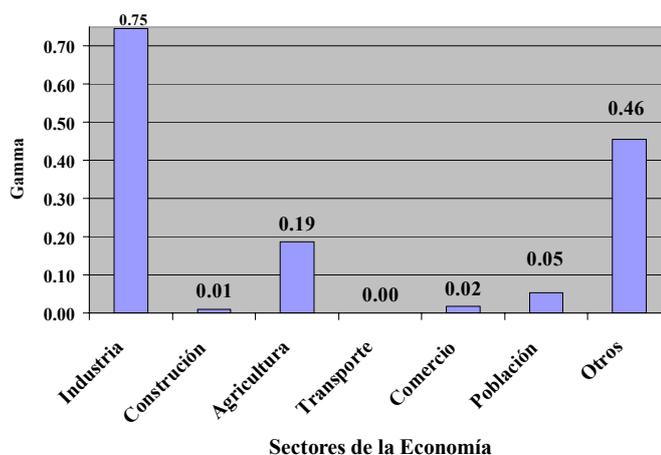


Fig. 3. 5. Comportamiento de γ por sectores de la economía cubana en el 2002.

Como se muestra en la figura 3.5 el sector de la industria alcanza el mayor valor con 0.75, esto se debe a que los mayores consumos del mismo se centran en el fuel oil y el crudo nacional los que son utilizados para la producción de energía y en la industria del cemento. Sin embargo al ser calculado el índice total para el año analizado, este disminuye su valor hasta 0.59 debido a la influencia del consumo de los derivados del petróleo que utilizan, los que son importados en su gran mayoría o producidos a partir de crudo importado.

El Indicador de Eficiencia Energética del sistema fue calculado siguiendo la metodología propuesta y utilizando los datos de las tecnologías utilizadas para la transformación energética, los que se muestran en la tabla 3.8. Utilizando el procedimiento propuesto se calculó λ el que tomó el valor de 0.255, como puede apreciarse resulta bajo si se tienen en cuenta los niveles de eficiencia de las tecnologías actuales.

Capítulo 3. Aplicación del Procedimiento Propuesto. Resultados y Discusión.

El sistema electro-energético cubano se basa en termoeléctricas con muchos años de explotación y baja eficiencia, lo que justifica el valor obtenido.

**Tabla 3. 8. Datos generales de las tecnologías utilizadas en Cuba para la producción de energía eléctrica.
(Oficina Nacional de Estadísticas. República de Cuba., 2002)**

Tipo de plantas	Consumo específico kg/kWh	Exergía específica (kJ/kg)	Eficiencia exergética	Generación bruta de electricidad (kWh)
Termoeléctricas	0.3	45248.64	0.285	12877.5
Plantas Diesel	0.254	51340.89	0.276	156.5
Turbinas de Gas	0.437	49100.66	0.168	1222.9
Planta de la I. Juventud	0.286	51340.89	0.245	156.5
Plantas aisladas	0.255	51340.89	0.275	156.5

Las pérdidas energéticas se calcularon mediante el procedimiento propuesto obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 3. 9. Costos energéticos relacionados con los indicadores propuestos.

Indicadores	B* (PJ)
α	99.56
β	249649.58
γ	102.51
λ	0.18
Total	249851.83

Como puede apreciarse los mayores costos se encuentran relacionados con el indicador β , esto se debe principalmente a la baja absorción de las sustancias contaminantes producida durante los procesos de transformación y al valor de las externalidades tomadas como estándar para el cálculo.

Con los indicadores obtenidos se procedió al cálculo del Índice de Sostenibilidad Energético Ambiental cuyo resultado de muestra a continuación.

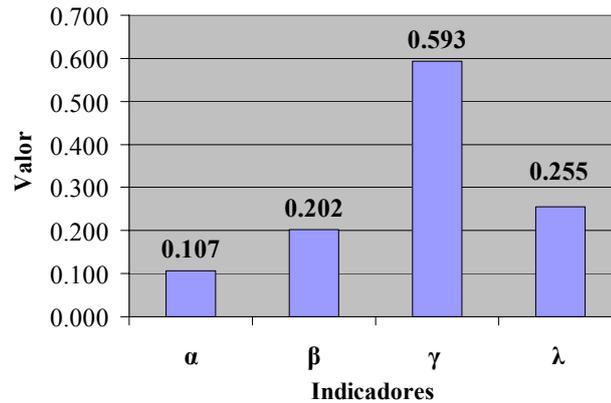


Fig. 3. 6. Valores de los indicadores calculados. Para Cuba en el año 2002.

En total el Índice de Sostenibilidad Energético Ambiental toma el valor de 0.202 para el año 2002, como se puede ver se encuentra muy cerca del valor del índice β lo cual se explica debido a la gran influencia que sobre los costos energéticos produce el nivel de limpieza de la exergía consumida en el sistema.

3.3.3 Análisis temporal del procedimiento de cálculo de la sostenibilidad energético ambiental para el caso de la República de Cuba entre los años comprendidos entre 1996 y 2002.

En el análisis temporal fueron calculados los cuatro indicadores, los costos energéticos relacionados a los indicadores y el índice de sostenibilidad energético ambiental, para cada uno de los años que forman parte del estudio. Seguidamente se mostraran los resultados comentados.

Para el caso del Indicador α se obtuvieron los siguientes resultados se muestran en la tabla 3.10 donde se muestran los resultados para cada año.

El indicador α varía sustancialmente entre los sectores de la economía debido a que en el sector industria se consumen grandes cantidades de bagazo, en especial en la azucarera. El bagazo juega un papel fundamental en el total de exergía consumida por dicho sector, además de ser el portador renovable más consumido en el país como se demostró anteriormente.

Tabla 3. 10. Comportamiento del indicador α por sector y año.

Año	Industria	Construcción	Agropecuario	Transporte	Comercio	Población	Otros
1996	0.32	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
1997	0.29	0.27	0.27	0.27	0.27	0.26	0.26
1998	0.26	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
1999	0.23	0.21	0.21	0.21	0.14	0.21	0.21
2000	0.20	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
2001	0.17	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
2002	0.13	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
2003	0.17	0.14	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13
2004	0.13	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10

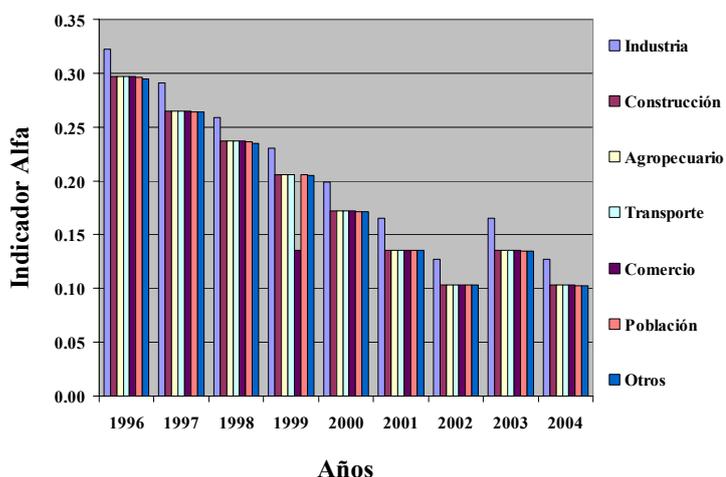


Fig. 3. 7. Comportamiento del indicador α por sector y año.

Como puede apreciarse existe una caída del valor del indicador a medida que van pasando los años lo que se corresponde con la depresión azucarera que ha vivido el país en los últimos años. En la figura 3.8 es mostrado en comportamiento de la producción de bagazo de caña para los años estudiados.

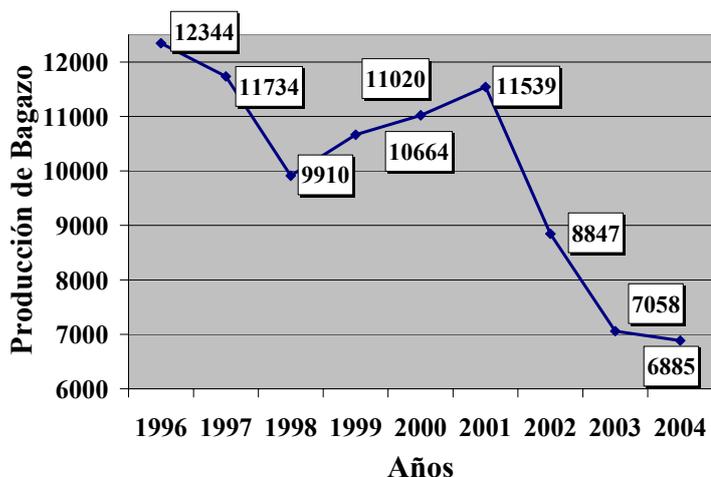


Fig. 3. 8. Comportamiento de la producción y consumo de bagazo de caña.

Tabla 3. 11. Comportamiento del indicador α por año.

Años	Alfa
1996	0.27
1997	0.26
1998	0.24
1999	0.25
2000	0.24
2001	0.24
2002	0.23
2003	0.15
2004	0.15

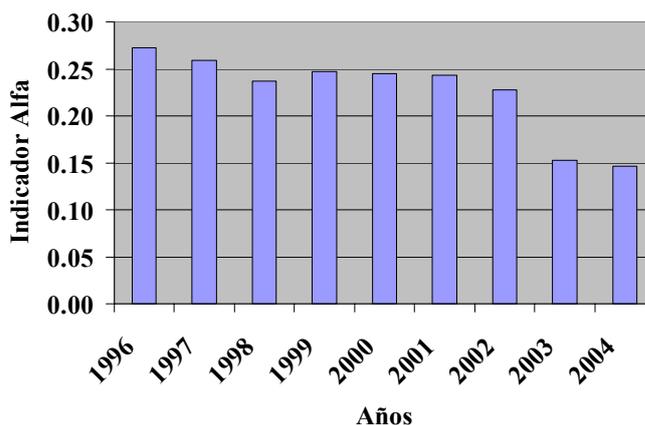


Fig. 3. 9. Comportamiento del indicador α por año.

Como puede ser apreciado existe una marcada tendencia a la disminución del Indicador de Renovabilidad de la exergía consumida, esto puede explicarse debido a la relación que tiene con el consumo de bagazo. La depresión azucarera y por ende la disminución de la producción-consumo del bagazo influirá de manera decisiva sobre el indicador analizado.

Capítulo 3. Aplicación del Procedimiento Propuesto. Resultados y Discusión.

El comportamiento del indicador β se muestra en la tabla 3.12 y en la figura 3.10 donde se observa la estabilidad que se mantiene durante los años y por los sectores. El sector con mayores valores Resulta Otros.

Tabla 3. 12. Comportamiento del indicador β por sector y año.

Año	Industria	Construcción	Agropecuario	Transporte	Comercio	Población	Otros
1996	0.13	0.09	0.14	0.09	0.14	0.19	0.49
1997	0.13	0.08	0.18	0.09	0.14	0.19	0.46
1998	0.13	0.09	0.18	0.09	0.13	0.19	0.45
1999	0.15	0.09	0.18	0.09	0.13	0.19	0.50
2000	0.16	0.09	0.20	0.09	0.13	0.18	0.49
2001	0.16	0.09	0.20	0.09	0.12	0.19	0.49
2002	0.16	0.09	0.21	0.09	0.13	0.19	0.49
2003	0.14	0.09	0.20	0.09	0.13	0.18	0.48
2004	0.14	0.09	0.20	0.09	0.13	0.18	0.43

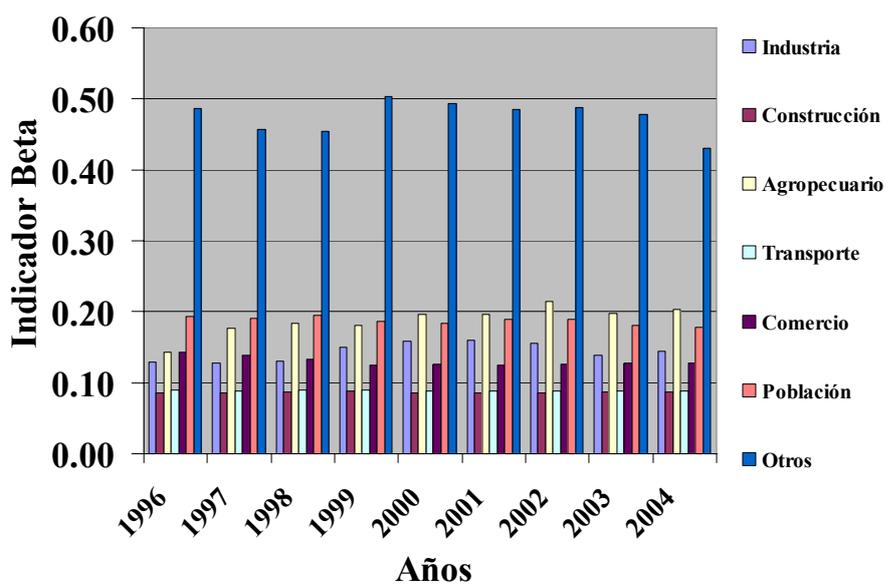


Fig. 3. 10. Comportamiento del indicador β por sector y año.

El indicador de limpieza de la energía consumida, en general presenta valores por debajo de los 0.20, solo en el caso del sector Otros se acerca a 0.50. La causa fundamental de lo anterior se relaciona fundamentalmente con la no absorción de las sustancias contaminantes generadas en los procesos de transformación energética, ya que en el caso de Cuba solamente se absorbe una parte del total del CO₂

Capítulo 3. Aplicación del Procedimiento Propuesto. Resultados y Discusión.

producido. Resulta necesario destacar el valor cero obtenido por el sector del transporte, el mismo se relaciona con el hecho de que prácticamente la totalidad de la energía consumida en dicho sector proviene de fuentes no renovables de energía.

Tabla 3. 13. Comportamiento por año de β .

Años	Beta
1996	0.18
1997	0.18
1998	0.18
1999	0.20
2000	0.21
2001	0.20
2002	0.20
2003	0.18
2004	0.18

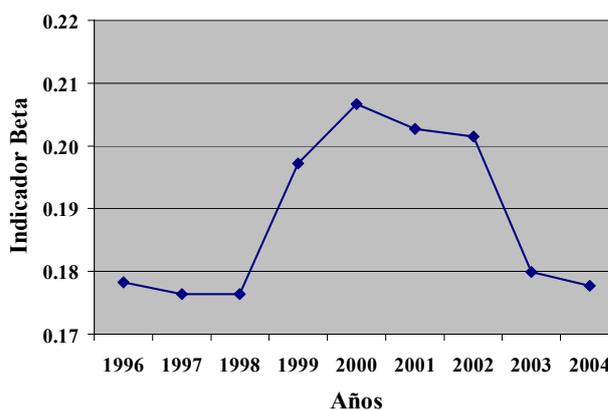


Fig. 3. 11. Comportamiento por año de β .

Este es un aspecto sobre el cual podría incidirse para el aumento de la sostenibilidad energético ambiental con resultados importantes, siendo necesaria la realización de inversiones en tecnologías para la remoción de las sustancias contaminantes.

Para el caso del indicador de auto satisfacción de la exergía consumida fue calculado y sus resultados son presentados en la tabla 3.14 y en la figura 3.12.

Tabla 3. 14. Comportamiento del indicador γ por sector de la economía y año.

Año	Industria	Construcción	Agropecuario	Transporte	Comercio	Población	Otros
1996	0.43	0.04	0.09	0.00	0.03	0.07	0.45
1997	0.43	0.06	0.13	0.00	0.03	0.07	0.42
1998	0.44	0.04	0.13	0.00	0.02	0.07	0.42
1999	0.48	0.03	0.14	0.00	0.02	0.06	0.47
2000	0.54	0.03	0.16	0.00	0.02	0.05	0.46
2001	0.57	0.01	0.16	0.00	0.02	0.05	0.45
2002	0.75	0.01	0.19	0.00	0.02	0.05	0.46
2003	0.48	0.01	0.17	0.00	0.02	0.04	0.45
2004	0.47	0.01	0.18	0.00	0.02	0.04	0.39

Capítulo 3. Aplicación del Procedimiento Propuesto. Resultados y Discusión.

En los resultados del cálculo de este indicador se puede apreciar como con el incremento de la producción y consumo del crudo nacional tiende a elevarse. El comportamiento descrito sería igual para incrementos de consumo de portadores renovables como de no renovables siendo preferibles los renovables ya que contribuirían al incremento del indicador α .

El indicador γ toma valores cero en el sector del transporte y valores muy bajos en el caso del los sectores de la construcción, el de comercio y el de la población, la causa fundamental se centra en que sus consumos están basados en portadores importados, como es el caso de los derivados del petróleo, acentuándose de esta manera la dependencia de las economías externas.

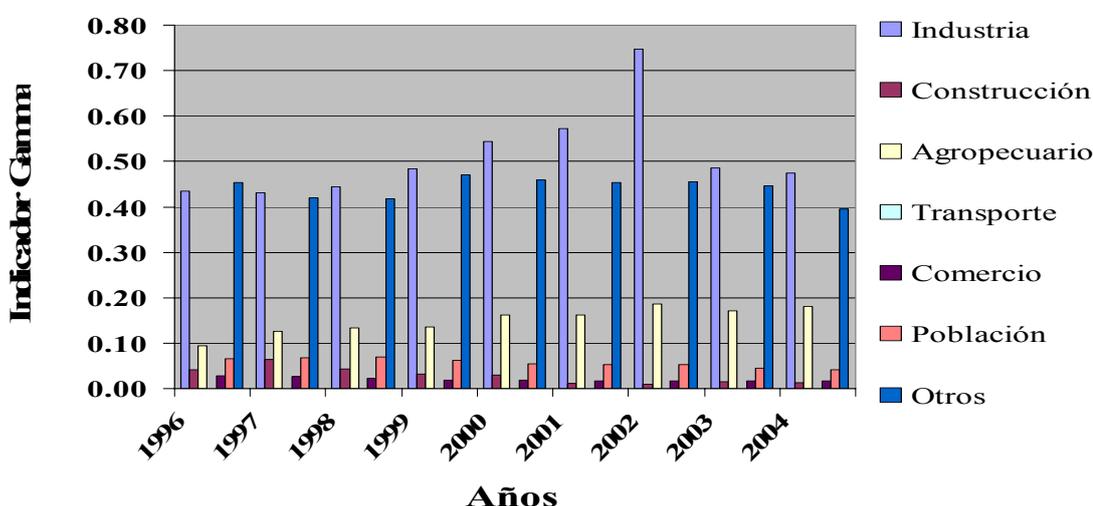


Fig. 3. 12. Comportamiento del indicador γ por sector y año.

Al analizar los resultados del indicador total por años mostrados en la tabla 3.16 y la figura 3.13, puede apreciarse una tendencia al incremento de su valor entre los años 1996 y 2002. Dicho incremento se relaciona con el aumento de la producción nacional de petróleo y su consumo en la industria de materiales de la construcción como para la producción de energía eléctrica, dicho comportamiento se muestra en la figura 3.14.

Tabla 3. 15. Comportamiento anual del indicador γ .

Años	Gamma
1996	0.37
1997	0.36
1998	0.37
1999	0.41
2000	0.45
2001	0.47
2002	0.59
2003	0.47
2004	0.59

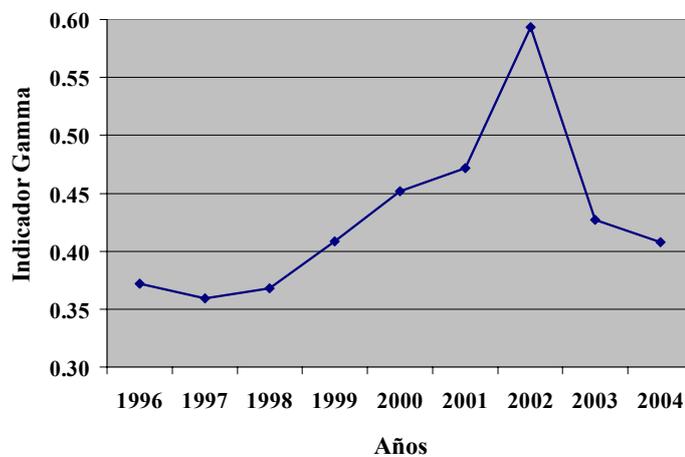


Fig. 3. 13. Comportamiento por año de γ .

Por otro lado en los años 2003 y 2004 el indicador disminuye ligeramente su valor. Este comportamiento puede explicarse debido a la disminución de la producción de bagazo, analizada anteriormente, al incremento del consumo de la exergía total figura 3.15 y a la discreta caída de la producción de petróleo, figura 3.16, utilizado en las termoeléctricas y fábricas de cemento del país.

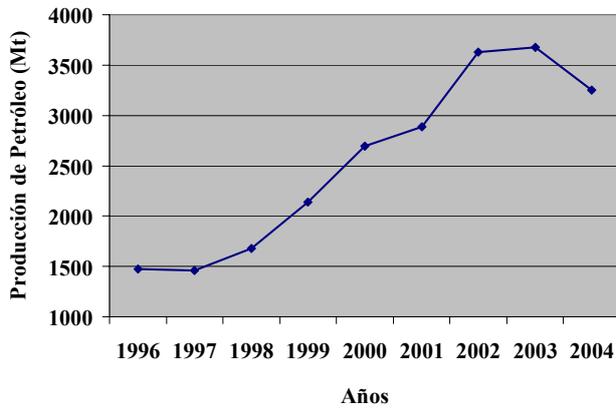


Fig. 3. 14. Producción de petróleo por año en Cuba entre 1996 y 2004.

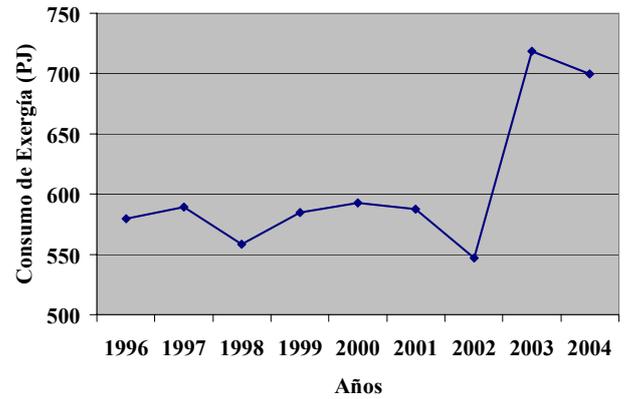


Fig. 3. 15. Consumo total de exergía en Cuba.

Los resultados para el caso del Indicador de Eficiencia Exergética (λ) de los sistemas de transformación, se muestran en la tabla 3.16 y la figura 3.16. Dichos resultados muestran que la eficiencia exergética que posee el sistema electro-energético cubano es inferior si se compara con las tecnologías modernas disponibles. La mejora de este indicador traería un incremento e la sostenibilidad energético ambiental del sistema analizado.

Tabla 3. 16. Análisis anual del indicador λ .

Años	Lambda
1996	0.261
1997	0.264
1998	0.263
1999	0.256
2000	0.258
2001	0.258
2002	0.255
2003	0.258
2004	0.257

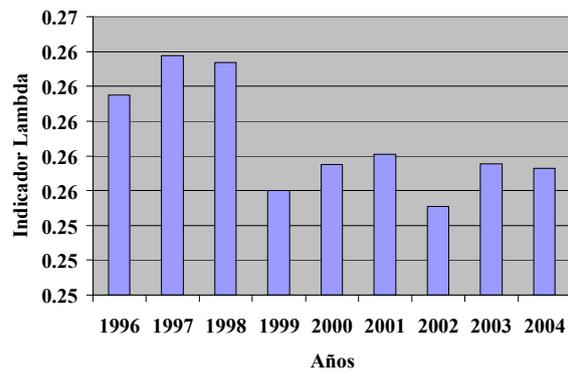


Fig. 3. 16. Comportamiento por año del indicador λ .

Al compilar en un gráfico el comportamiento de los cuatro indicadores con respecto a los años comprendidos entre 1996 y 2004, se verá que los mayores valores son los alcanzados por el de Auto Satisfacción del consumo de exergía (γ) con cierta tendencia al incremento, mientras el Indicador de

Capítulo 3. Aplicación del Procedimiento Propuesto. Resultados y Discusión.

Renovabilidad (α) posee tendencia a disminuir. Los otros dos indicadores se mantienen en un entorno más o menos estable.

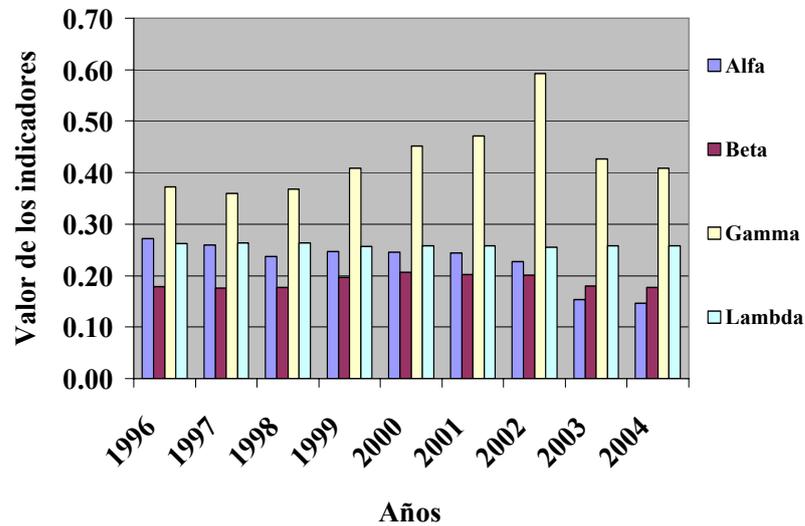


Fig. 3. 17. Análisis de los cuatro indicadores por año.

Al calcular los costos exergéticos se identifica la diferencia del valor relacionado con el Indicador de Limpieza de la Exergía Consumida con el resto de los indicadores. La causa se encuentra relacionada con los valores de las externalidades utilizados, estos provocan la magnitud de los costos exergéticos obtenidos. Este resultado muestra la influencia del indicador β sobre el I_{SEA} , no obstante debe seguirse trabajando sobre la valoración del daño ambiental debido a la dispersión de los valores de las externalidades reportadas en la literatura.

Tabla 3. 17 Costos exergéticos calculados para cada indicador y año.

Año	Alfa B* (PJ)	Beta B* (PJ)	Gamma B* (PJ)	Lambda B* (PJ)	Total B* (PJ)
1996	68.2	$1.34 \cdot 10^5$	32.3	0.152	$1.34 \cdot 10^5$
1997	74.0	$1.31 \cdot 10^5$	31.7	0.164	$1.31 \cdot 10^5$
1998	90.6	$1.29 \cdot 10^5$	30.8	0.167	$1.29 \cdot 10^5$
1999	82.3	$1.37 \cdot 10^5$	35.8	0.171	$1.37 \cdot 10^5$
2000	78.5	$1.39 \cdot 10^5$	40.1	0.175	$1.39 \cdot 10^5$
2001	75.0	$1.32 \cdot 10^5$	41.5	0.179	$1.32 \cdot 10^5$
2002	99.6	$2.14 \cdot 10^5$	48.6	0.185	$2.14 \cdot 10^5$
2003	75.0	$1.32 \cdot 10^5$	41.5	0.179	$1.32 \cdot 10^5$
2004	99.6	$2.14 \cdot 10^5$	48.6	0.185	$2.14 \cdot 10^5$

Capítulo 3. Aplicación del Procedimiento Propuesto. Resultados y Discusión.

El resultado por año del Índice de Sostenibilidad Energético Ambiental es mostrado en la tabla 3.21 y la figura 3.20, en los mismos se constatan los bajos valores obtenidos que se relacionan con la política energética vigente.

Tabla 3. 18. Resultados del Índice de Sostenibilidad Energético Ambiental (Isea) para cada año analizado.

Años	Isea
1996	0.18
1997	0.18
1998	0.18
1999	0.20
2000	0.21
2001	0.20
2002	0.20
2003	0.18
2004	0.18

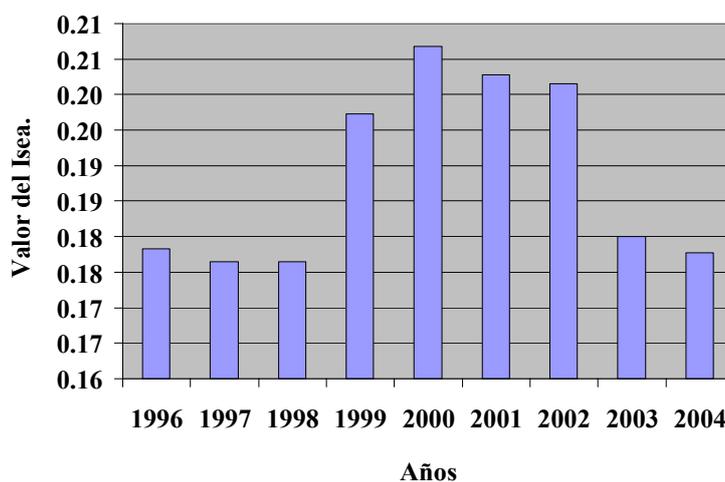


Fig. 3. 18 Índice de Sostenibilidad Energético Ambiental (Isea) para cada año analizado.

El análisis realizado muestra que pueden tomarse medidas para mejorar el estado de la sostenibilidad energético ambiental en el caso Cuba. Especialmente en los referente a la limpieza de la exergía consumida en el sistema y en lo referente a la renovabilidad de la exergía consumida ya que son los indicadores donde se concentran los mayores costos exergéticos. En el caso de la eficiencia de los sistemas de transformación es otro aspecto sobre el que debe trabajarse, para lograr parámetros acorde a los nuevos estándares mundiales.

Como queda demostrado sería bueno contar con el punto óptimo que podrían tomar los indicadores para cada uno de los casos analizados, esto permitiría tener una noción de cuan por debajo se encuentra su estado y cuanto se puede hacer en aras de mejorarlo. Para ello sería necesario definir una matriz energética que garantice los mayores valores para los indicadores que influyen sobre la Sostenibilidad Energético Ambiental.

3.4 Consideraciones para definir una Matriz Energética.

Para el desarrollo económico-social de cualquier región, es importante contar con una matriz energética que satisfaga las necesidades de consumo energético según las condiciones del sistema, las que resultan variables en el tiempo. Dentro de las condiciones a tener en cuenta se encuentran el continuo crecimiento de la demanda de energía, este aumento es función del crecimiento de la población. Otra de las condiciones es la disminución paulatina de las reservas de los combustibles fósiles y el consecuente deterioro ambiental local y global debido al consumo desproporcionado de los mismos, no teniendo en cuenta las reservas de portadores de energía renovable aprovechables actualmente que se pierden continuamente. También la generación a pequeña escala y distribuida debe ir desarrollándose en los próximos años hasta poseer una relación costo-eficiencia que la conviertan en competitiva frente a las tecnologías actuales.

Al poseer un escenario de condiciones complejas se impone la necesidad de modelos matemáticos que permitan planificar el uso de los recursos energéticos disponibles, cualquiera de estos posibles modelos deben responder a exigencias que posibiliten el acercamiento a la sostenibilidad energético ambiental.

Para la formulación del procedimiento matemático deben cumplirse una serie de principios que tengan en cuenta el costo, la sostenibilidad energético ambiental, las condiciones reales de la tecnología y los consumos de los recursos energéticos. Estos principios se proponen seguidamente:

Potenciar la utilización de las energías renovables.

Favorecer la elevación de la eficiencia exergética de los sistemas de transformación energética, estimulando el desarrollo tecnológico.

Disminuir la emisión de sustancias contaminantes vertidas al medio, logrando estabilidad en cuanto a su capacidad de proveer recursos a los seres vivos que cohabitan en el sistema local y el planeta.

Potenciar la autosatisfacción en el consumo de energía, de manera que disminuyan las importaciones de portadores energéticos.

Lograr que la diferencia entre la disponibilidad y el consumo de los portadores energéticos a lo largo del tiempo sea positiva.

Lograr la rentabilidad del conjunto de tecnologías instaladas en el sistema a partir de índices económicos que guíen a los tomadores de decisiones.

Capítulo 3. Aplicación del Procedimiento Propuesto. Resultados y Discusión.

Para la definición de la matriz energética se propone un procedimiento general de optimización en el que como función objetivo puede ser considerado el costo total. En la definición de dicha función se requiere de la inclusión de términos relacionados con los costos de compra y producción de los portadores combustibles y de la electricidad, de los costos asociados a las emisiones y los ingresos asociados a las ventas de portadores combustibles y electricidad.

Función objetivo:

$$\text{Costo Total} \equiv f(Bc_{com}, Be_{com}, Be_{com}, Ui, \psi, Bc_{pro}, Bc_{pro}, Be_{ex}, Bc_{ex}, Wp, CTax, Z'_p, Z_{tareV}, Z_V, Tv)$$

$$f(Bc_{com}, Be_{com}, Be_{com}, Ui, \psi, Bc_{pro}, Bc_{pro}, Be_{ex}, Bc_{ex}, Wp, CTax, Z'_p, Z_{tareV}, Z_V, Tv) \rightarrow \text{Min}$$

Donde,

Bccom, exergía de portadores combustibles (p) no utilizados para la generación de electricidad comprada por el sector (s) en kJ.

Becom, exergía eléctrica comprada por el sector (s) en kJ

Bcpro, exergía de portadores combustibles (p) no utilizados para la generación de electricidad producida por el sector (s) en kJ

Bex, exergía vendida por el sector (s), en kJ

Ctax, externalidad por contaminante (k), en\$/t

U, número de unidades de la tecnología (i)

Wp, factor de emisión en t/t

Zp, Costo del portador (p) en \$/t

Zin, Costo de instalación, llave en mano, de la tecnología (i), en\$/kW

ZOM, Costo de operación y mantenimiento, de la tecnología (i), en \$/kW

Z'_p, Costo de producción del portador (p), en \$/t

ZtarcC, Tarifa de compra de los portadores combustibles (p), en \$/kJ

Capítulo 3. Aplicación del Procedimiento Propuesto. Resultados y Discusión.

Z_{tareC} , Tarifa de compra de energía eléctrica por tipo de tarifa (f) tarifa, en \$/kWh

Z_{tarV} , Tarifa eléctrica de venta en \$/kWh

ZV , costo de venta del portador (p)

i, tipo de tecnología adimensional

p, portador transformado en la tecnología (i) adimensional

c, consumidor adimensional

f, tipo de tarifa según consumidor (c) adimensional

j, tarifa de venta

$\Psi_{(i)}$, eficiencia exergetica de la tecnología (i) adimensional.

T_v , tiempo de vida útil de la tecnología (i)

La función objetivo debe estar sujeta a las siguientes restricciones:

Restricción 1: Demanda que se genera en el sistema, tanto para el caso de la energía eléctrica como para el resto de los portadores energéticos. Esta restricción dependerá en el caso de la energía eléctrica:

$$\mu_1 \left(U_{i(i)}, N_{e(i)}, B_{e_{com(s)}}, B_{e(s)} \right) \geq 0$$

Donde,

B_e , demanda de exergía eléctrica en kWh

F_u , factor de utilización de la tecnología (i)

Restricción 2: Caso del resto de los portadores su forma sería:

$$\mu_2 \left(Bc_{pro(s,p)}, Bc_{com(s,p)}, Bc_{(s,p)} \right) \geq 0$$

Donde,

Bc , demanda de exergía de portadores combustibles.

Restricción 3: Considera que las reservas de los portadores energéticos del sistema deben ser conservadas lo más posible incidiendo en el ahorro de los mismos

$$\mu_3 \left(Bc_{pro(s,p)}, Ui_{(i)}, Ne_{(i)}, \psi_i, B_{Res(s,p)} \right) \leq 0$$

Restricción 4: Balance de los flujos de portadores que tienen lugar en el sistema se utilicen o no para la producción de energía eléctrica. En el caso de los portadores no utilizados en la generación eléctrica tendrá en cuenta:

$$\mu_4 \left(Bc_{com(s,p)}, Bc_{pro(s,p)}, Bc_{con(s,p)}, Bc_{exp(p)} \right) \geq 0$$

donde,

Bc_{exp} , exergía exportada del sistema en (kJ)

$Bc_{con(s,p)}$, exergía de portadores no eléctricos consumida en el sistema en (kJ)

Restricción 5: En el caso de los portadores utilizados para la generación eléctrica tendrá en cuenta los siguientes elementos:

$$\mu_5 (Be_{com(s,p)}, Ui_{(s,i,p)}, Ne_{(i)}, \psi_i, Be_{con(s,p)}, Be_{exp}) = 0$$

donde,

Be_{exp} , exergía de la electricidad exportada del sistema en (kJ)

$Bc_{con(s,p)}$, exergía de la electricidad consumida en el sistema en (kJ)

Restricción 6: Valor Actual Neto (VAN),

Restricción 7: Tasa Interna de Retorno (TIR)

Restricción 8: Tiempo de Recuperación de la Inversión (TR)

La función objetivo deberá ser minimizada, buscando las tecnologías que permitan el mínimo costo y los valores de los indicadores que conforman el Índice de Sostenibilidad energético Ambiental para la condición de optimalidad del sistema ($\alpha^*, \beta^*, \gamma^*, \lambda^*$)

Variables del modelo:

$Bccom$, exergía de portadores combustibles no utilizados para la generación de electricidad comprada por el sector (s) en kJ

$Becom$, exergía eléctrica comprada por el sector (s) en kJ

$Bcpro$, exergía de portadores combustibles no utilizados para la generación de electricidad producida por el sector (s) en kJ

Ui , número de unidades de la tecnología (i)

Bc_{exp} , exergía exportada del sistema en (kJ)

Be_{exp} , exergía de la electricidad exportada del sistema en (kJ)

$Be_{con(s,p)}$, exergía de la electricidad consumida en el sistema en (kJ).

3.4.1 Valores de las constantes que forman parte del procedimiento para el cálculo de la matriz.

Se considera que las constantes, que necesariamente deben ser entradas a un procedimiento de cálculo, son las siguientes:

$Bc_{con(s,p)}$, exergía consumida en el sistema en (kJ)

$Be_{con(s,p)}$, exergía de la electricidad consumida en el sistema en (kWh)

B_{Res} , reserva de exergía en el sistema en (PJ).

Bc , demanda de exergía de portadores combustibles.

Be , demanda de exergía eléctrica en kWh

C_{tax} , tasa de carbono vigente, \$/t

F_u , factor de utilización de la tecnología (i)

I_n , tasa de interés vigente

T_v , tiempo de vida útil de la tecnología (i)

W_p , factor de emisión t/t

Z_{in} , Costo de instalación, llave en mano, de la tecnología (i) \$/kW

ZOM , Costo de operación y mantenimiento \$/kW

Z_p , Costo del portador (p) \$/t

Z_{tarC} , Tarifa de compra de los portadores combustibles en \$/kJ

Z_{tarE} , Tarifa de compra de energía eléctrica en \$/kWh

Z_{tarV} , Tarifa eléctrica de venta en \$/kWh

ZV , costo de venta del portador (p)

Capítulo 3. Aplicación del Procedimiento Propuesto. Resultados y Discusión.

τ_{op} , tiempo de operación anual de la tecnología (i) en (h/año)

$\psi_{(i)}$, eficiencia exergética de la tecnología (i) adimensional.

Los valores de las constantes pueden obtenerse de diversas fuentes de datos considerando las condiciones del sistema que se analice. En los caso de la exergía consumida en el sistema ($B_{C_{con(s,p)}}$), la electricidad consumida en el sistema ($B_{e_{con(s,p)}}$) y reserva de exergía en el sistema ($B_{Res(s,p)}$), los datos se tomarán por sectores de la economía (s) y portador de energía (p), de Anuarios Estadísticos. La demanda de exergía de portadores combustibles (B_c).para cada sector de la economía (s) y portador de energía (p) también fue tomada de (MEPLAN, 2005) y se expresó en (kWh).

La demanda de electricidad (B_e) por sector (s) expresada en (kW), se tomarán de las estadísticas del sistema.

Los datos de emisión de sustancias contaminantes (W_p) pueden ser tomados del informe del EP-42 Emission Factors, 1998 (U.S. Environmental Protection Agency, 1998), y se expresará en (t/t). El dato de la tasa de carbono vigente (C_{tax}), como en el caso de cuba no se encuentra legislada sería posible asumir los valores utilizados por (Botero, 2000) y se expresarán en (\$/t)

Se sugiere que la selección de las tecnologías satisfaga la tendencia de generación distribuida establecida en estos últimos años en Cuba. Los datos de Costo de instalación de la tecnología, llave en mano (Z_{in}) en (\$/kW), el Costo de operación y mantenimiento (ZOM), tanto fijo en (\$/kW) como variable (\$/kWh), el tiempo de operación anual (τ_{op}) de la tecnología (i) en (h/año), el tiempo de vida útil (T_v) de la tecnología (i), la eficiencia exergética (ψ) de la tecnología (i) y factor de utilización de la tecnología (i) (F_u) que caracterizan las tecnologías utilizadas, se podrían tomar directamente de la información facilitada por los fabricantes o de reportes como (Siddiqui, 2003b).

Los Costo del portador (p) (Z_p) en (\$/t), la Tarifa de compra de los portadores combustibles (Z_{tarC}) en (\$/kJ) y el valor de venta del portador (p) Z_V en (\$/PJ), se pueden tomar del reporte publicado por (Beyond Petroleum, 2006), en el caso de las Tarifa de compra de energía eléctrica (Z_{tarE}) en (\$/kWh) y la Tarifa eléctrica de venta (Z_{tarV}) en (\$/kWh) deben ser tomadas del (MINISTERIO DE FINANZAS Y PRECIOS, 2001). La tasa de interés (I_n) se asumirá según sean las condiciones financieras existentes en el momento en que se realice el análisis

Capítulo 3. Aplicación del Procedimiento Propuesto. Resultados y Discusión.

Con el procedimiento de optimización se buscará determinar los parámetros que debe cumplir la matriz energética de un sistema dado, para que teniendo que incurrir en los menores costos posibles permita determinar los valores de los indicadores correspondientes a la condición de óptimo y de esta forma poder determinar, a su vez el valor del índice de sostenibilidad que servirá para establecer un criterio de comparación del estado del sistema que se evalúa, respecto al estado que tendría el sistema en la condición de óptimo.

Conclusiones.

Para alcanzar la sostenibilidad energética resulta necesario tener en cuenta cuatro indicadores, renovabilidad energética (α), eficiencia exergética de los sistemas de transformación (η), limpieza de la exergía consumida (β) y auto satisfacción exergética del sistema (γ); estos agrupados de forma armónica, mediante la fracción de costo exergético asociado a cada uno de ellos, permiten evaluar la influencia que sobre la sostenibilidad energética de un sistema dado tienen las fuentes de energía utilizadas, la eficiencia de transformación, el nivel de impacto sobre el medioambiente asociados a las tecnologías de transformación energéticas y la capacidad de auto sostenimiento energético.

En el análisis temporal realizado al caso Cuba, puede apreciarse la tendencia a la disminución del indicador de Renovabilidad de la Energía consumida en el sistema, disminuyendo desde 0.30 en el 1996 hasta 0.107 en el 2002, aspecto este que se corresponde con la depresión azucarera; quedando clara la influencia de la producción de bagazo sobre dicho indicador.

Cada uno de los indicadores permite focalizar los aspectos que influyen negativamente sobre la sostenibilidad energético ambiental del sistema, ejemplo de ello es el análisis del Indicador de Renovabilidad siendo analizado por sectores, donde se muestra que para Cuba la mayor fuente de exergía renovable que se consume proviene del portador bagazo, siendo el nivel de consumo del mismo proporcional al valor del indicador en los sectores en el sistema analizado.

La cantidad de sustancias, que afectan el medio, abatidas es uno de los factores que se relaciona con el indicador β , en la situación particular de Cuba la absorción de las sustancias contaminantes se reducen solo al CO₂ y esto de manera natural siendo esta la razón fundamental de los bajos valores del indicador. Por otro lado, los costos exergéticos relacionados con el impacto de las sustancias contaminantes dependen fundamentalmente del valor de las externalidades utilizadas como medidor del daño ambiental lo que resalta la influencia de este indicador.

En el caso del Indicador γ muestra la pobre utilización de recursos locales en los sectores de transporte, construcción comercio y población, siendo consecuencia del alto consumo de derivados del petróleo en dichos sectores. No siendo así en el sector industria ya que en dicho sector el crudo nacional y el bagazo constituyen el 81% del total consumido.

Conclusiones.

La eficiencia exergética de las plantas térmicas que son la base del sistema electroenergético cubano se encuentran en el orden del indicador eficiencia exergética (λ) oscilando alrededor de 0.255.

El Índice de sostenibilidad energético ambiental (I_{SEA}) toma el valor de 0.202, muy parecido al valor del indicador de limpieza de la exergía consumida β lo que se debe a la gran influencia que sobre el costo exergético total posee el costo relacionado con el impacto ambiental de las sustancias contaminantes que son vertidas al ambiente.

El procedimiento de optimización den ser determinados los parámetros que debe cumplir la matriz energética de un sistema dado, para que teniendo que incurrir en los menores costos posibles permita determinar los valores de los indicadores correspondientes a la condición de óptimo y de esta forma poder determinar, a su vez el valor del índice de sostenibilidad que servirá para establecer un criterio de comparación del estado del sistema que se evalúa, respecto al estado que tendría el sistema en la condición de óptimo.

Recomendaciones.

Profundizar en la determinación de un factor de daño ambiental que de valor al impacto medioambiental provocado por las sustancias contaminantes que se emiten durante los procesos de transformación energética, asignando un valor único a la externalidad sin importar región o país.

Estudiar la forma de integrar el índice de sostenibilidad energético ambiental a procedimientos que determinen matrices energéticas, para contribuir a la toma de decisiones de planeación energética para que así sea logrado un acercamiento a la sostenibilidad energética.

Analizar los datos necesarios para la aplicación del procedimiento propuesto, con el objetivo de enriquecer la recopilación de datos estadísticos por parte de los organismos encargados del tema.

Realizar la aplicación del procedimiento propuesto a sistemas sociales con otros contextos ya sean desarrollados o subdesarrollados, con el objetivo de comprobar su eficacia y posibilidades.

Continuar profundizando en las condiciones del modelo de cálculo para la definición de matrices energéticas y su implementación computacional.

Bibliografía.

- ANNAN, K. (2002) *Conferencia sobre Medio Ambiente y Desarrollo*. Johannesburgo, Sur África, Naciones Unidas.
- AYRES, R., AYRES L., AND MARTINÁS, K., (1998) Exergy, waste accounting, and life cycle analysis. *Energy and Buildings*, Vol. 23, pp. 335-363.
- AYRES, R. A., L. (1996) *Industrial Ecology. Towards closing the material cycle*. Edward Elgar Publishing, Cheltenham U.K. y Northampton.
- AYRES, R. M., K. (1995) Waste Potential Entropy: The ultimate Ecotoxic. *Economie Applique*, Vol 48, pp. 95-120.
- AYRES, R. U. (1978) *Resources, Environment, and Economics*. John Wiley and Sons, Nueva York.
- AYRES, R. U., AYRES L. W. AND WARR B., (2002) Exergy, Power and Work in the US Economy, 1900-1998. *INSEAD*, 52.
- BALOCCO, C., AND GRAZZINI G., (2000) Thermodynamic parameters for energy sustainability of urban areas. *Solar Energy*, 69, 351– 356.
- BALOCCO, C., PAPESCHI S., GRAZZINI G. AND BASOSI R., (2004) ANALYSIS Using exergy to analyze the sustainability of an urban area. *Ecological Economics*, 48, 231– 2.
- BEJAN, A., ET AL, (1996) *Entropy Generation Minimization*. Boca Raton FL, CRC Press.
- BEJAN, M. (1994) Energy policy, in *Entropy Generation through Heat and Fluid Flow*. Wiley, New York.
- BEJAN, M., AND BEJAN A., (1982) Supply-side approach to energy policy. *Energy Policy* 10, 153–161.
- BEYOND PETROLEUM (2006) BP Statistical Review of World Energy June 2006.
- BORCHIPELLINI, R., MASSARDO, AF, SANTARELLI M., (2000) A carbon exergy tax evaluation based on the efficient use of energy resources: a case study. *International Journal of Applied Thermodynamics*, Vol. 3(3), 129–45.
- BORCHIPELLINI, R., MASSARDO, AF, SANTARELLI, M., (1999) Carbon tax vs. CO2 sequestration effects on environmental analysis of existing power plants. IN IN: ISHIDA M, T. G., MORAN MJ, KATAOKA H, EDITORS (Ed.) *Proceedings of ECOS'99*. p. 287-93.
- BORGSTROM, G. (1967) *The Hungry Planet*, New York, Ed. MacMillan.
- BOTERO, E. A. (2000) Valoración exergética de recursos naturales, minerales, agua y combustibles fósiles. *Departamento de Ingeniería Mecánica*. Zaragoza, Universidad de Zaragoza.
- CENDRERO, A., FRANCÉS E., DEL CORRAL D., FERMÁN J. L., FISCHER D., DEL RÍO L., CAMINO M., AND LÓPEZ A. (2003) Indicators and Indices of Environmental Quality for Sustainability Assessment in Coastal Areas; Application to Case Studies in Europe and the Americas. *Journal of Coastal Research*, Vol. 19, No. 4, pp. 919–933.
- CHAPMAN, P., AND ROBERTS, F. (1983) “Metals and Energy”. *Butterwrth & Co. Ltd*. London.

Bibliografía.

- CLAASSEN, P., ET. AL., (1999) Utilisation of biomass for the supply of energy carriers. *Microbiol Biotechnol*, 52, 741-755.
- CLEVELAND, C. J., KAUFMANN R. K. AND STERN D. I., (2000) Analysis Aggregation and the role of energy in the economy. *Ecological Economics*, Vol: 32.
- CLEVELAND, C. J., R. AYRES, ET AL. (1996) Natural Capital, Human Capital and Sustainable Economic Growth. IN UNIVERSITY, C. F. E. A. E. S. A. B. (Ed.) *Work Shop on Assesing the Role of Human and natural Capital in Economic Production*. Boston.
- CLEVELAND, C. J., R. CONSTANZA, C. HALL AND R. KAUFMANN (1984) Energy and the U.S. Economy: A Biophysical Perspective. *Science*, 225, pp. 890-897.
- CLEVELAND, C. J. K., R. K.; STERN, D. I. (1998) Aggregation and Role of Energy in the Economy. *Center for Energy and Environmental Studies and Department of Geography*. Boston University, Boston.
- CNUMAD (1992) *Conferencia de Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo*, . Río de Janeiro Brasil, MOPTMA, Madrid.
- CONSTANZA, R. (1980) Embodied energy and economic evaluation. *Science*, 210, pp. 1219-1224.
- CONSTANZA, R. C., J.; DALY, H.; GOODLAND, R.; NORGAARD, R. (1997) An introduction to Ecological Economics. *CRC Press LLC, New York*.
- CORNELISSEN, R. L. (1997) Thermodyanmics and sustainable development, The use of exergy analysis and the reduction of irreversibility. Twente the Netherlands, University of Twente.
- COTTRELL, F. (1955) Energy and Society: the relations between Energy. *Social Change and Economic Development*. New York, McGraw Hill.
- CUBAENERGÍA (2002) Nuevo Frente de Energía Renovable. *Alerta Informativa, Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía INFORMATIVA, S er ie Ener g í a.*, No. 21.
- CURTI, V., VON SPAKOVSKY, M.R., FAVRAT, D., (2000) An environomic approach for the modeling and optimization of a district heating network based on centralized and decentralized heat pumps, cogeneration and/or gas furnace. Part I: methodology. Part II: application. *International Journal of Thermal Sciences* Vol. 39, 721-41.
- DALY, H. E. (1973) Toward a Political Economy of Biophysical Equilibrium and Moral Growth. *en Daly, H. E. (ed.) (1973) Toward a steady Economy*. San Francisco, W. H. Freeman.
- DALY, H. E. (1977) *Steady-State Economic*. W. H. Freeman. San Francisco.
- DALY, H. E. (1985) The circular flow of exchange value an the linear throughput of matter-energy: a case or misplaced concreteness. *Review of Social Economy*, Vol: 43, pp. 279-297.
- DALY, H. E. (1991) From empty-world economics to full-world economics, en Goodland et al. (eds.): Environmentally sustainable. *Economic Development: Building on Brundteland*. París UNESCO.
- DALY, H. E. (1996) Desarrollo Sostenible y escala optima de la economía. *en F. Díaz Pineda (ed) (1996): Ecología y desarrollo*. Editorial Complutense, Madrid.
- DEWULF, J., VAN LANGENHOVE, H. (2003) Exergetic material input per unit of service (EMIPS) for the assessment of resourceproductivity of transport commodities. *Resources, Conservation and Recycling, Elsevier Science B.V*, Vol. 38, 161-174.

Bibliografía.

- DEWULF, J., VAN LANGENHOVE, H., DIRCKX, J., (2001) Exergy analysis in the assessment of the sustainability of waste gas treatment systems. *The Science of the Total Environment, Elsevier Science B.V.*, Vol. 273, 41-52.
- DEWULF, J., VAN LANGENHOVE, H., MULDER, J., VAN DEN BERG, MMD, VAN DER KOOL, H.J., DE SWAAN ARONS, J., (2000) Illustrations towards quantifying the sustainability of technology. *Green Chem*, Vol. 2, 108–114.
- DINCER, I. (1998) Energy and environmental impacts: present and future perspectives. *Energy Sources* Vol. 20 (4/5), 427–453.
- DINCER, I. (2002) The role of exergy in energy policy making. *Energy Policy*, Vol: 30, 137–149.
- EDGERTON, R. H. (1992) *Available Energy and Environmental Economics*, Toronto, D.C. Heath.
- ELKINGTON, J. (1997) *Cannibals with forks: the triple bottom line of 21st Century business*, Oxford Capstone.
- EUROPEAN COMMISSION. (1997) ExternE, Externalities of Energy, European Commission, Directorate
-General XII, Science, Research and Development. Belgica.
- FATH, B. D., AND CABEZAS H., (2004) Exergy and Fisher Information as ecological indices. *Ecological Modelling*, Vol: 174, 25–35.
- FRANGOPOULOS, C. (1992) An introduction to environomic analysis and optimization of energy-intensive systems. In: Valero A, Tsatsaronis G, editors. *Proceedings of ECOS'92. ASME*.
- GEORGESCU-ROEGEN, N. (1971) *The Entropy Law and Economic Process*. Harvard University Press, Cambridge.
- GEORGESCU-ROEGEN, N. (1975) Energy and economic myths. *Southern Economic Journal*, Vol: 41, pp. 347- 381.
- GONG, M., AND WALL G., (2001) An exergy and sustainable development part2: indicators and methods. *Exergy International Journal*, Vol: 1 (4), 217– 233.
- HAU, J. L., AND BAKSHI B. R., (2004) Short communication, Promise and problems of emergy analysis. *Ecological Modelling*, Vol: 178, 215–225.
- HAWKEN, P. (1993) The Ecology of Commerce. *The on line Better World Magarzine*, Vol: 6 octubre-noviembre.
- HERMANOWICZ, S. W. (2004) Entropy and Energy: Toward a Definition of Physical Sustainability.
- IEA GREENHOUSE R&D PROGRAMME (1994) *Greenhouse Emissions from Power Stations*. Cheltenham, U.K.
- INIYAN, S., SUMATHY K., SUGANTHI L. AND ANAND S. A., (2000) Sensitivity analysis of optimal renewable energy mathematical model on demand variations. *Energy Conversion & Management* Vol: 41, 199-211.
- IVAR, S., AND ERTESVA G., (2001) Society exergy analysis: a comparison of different societies. *Energy*, Vol: 26, 253–270.

Bibliografía.

- IVAR, S., ERTESVA G. AND MIELNIK M., (2000) Exergy analysis of the Norwegian society. *Energy*, Vol: 25, 957–973.
- JIMÉNEZ, H. L. (1992) Desarrollo Sostenible Global: bases para una estrategia planetaria. *IV Congreso Nacional de Economía*. Sevilla, España.
- JIMÉNEZ, H. L. (Ed.) (2000) *Desarrollo Sostenible*, España.
- KORONEOS, C., SPACHOS T. AND MOUSSIOPOULOS N. (2003) Exergy analysis of renewable energy sources. *Renewable Energy* Vol: 28, 295–310.
- KOTAS, T. J. (1995) *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*, Reprint Ed.. Krieger, Malabar, Florida.
- LAZZARETTO, A., TOFFOLO, A. (2004) Energy, economy and environment as objectives in multi-criterion optimization of thermal systems design. *Energy*, Vol. 29 pp. 1139-1157.
- LUDOVISI, A., AND POLETTI A., (2003) Use of thermodynamic indices as ecological indicators of the development state of lake ecosystems 2. Exergy and specific exergy indices. *Ecological Modelling* Vol: 159, 223-238.
- MARECHAL, F. D., AND FAVRAT E. J., (2004) Energy in the perspective of the sustainable development : the 2000 W society challenge. *Journal of Cleaner Production*, 22 p.
- MARTÍNEZ, A. J., ROCA J. Y SÁNCHEZ J., (1998) *Curso de Economía Ecológica*, México, D.F. México, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Oficina Regional para América Latina y el Caribe. Red de Formación Ambiental para América Latina y el Caribe.
- MARTÍNEZ, A. J., Y SCHLÜPMAN K., (1992) La Ecología y la Economía, Fondo de Cultura Económica, Madrid. misplaced concreteness. *Review of Social Economy*, Vol: 43, pp. 279-297.
- MARTÍNEZ, R., AND OCAÑA V., (2003) Disminución de la contaminación ambiental mediante el control de la densidad del humo de escape de los motores diesel. *Revista Centro Azúcar*, no.1.
- MEPLAN (2005) Anuario Estadístico de la República de Cuba, Año 2004. <http://www.camaracuba.cu/TPHabana/Estadisticas2004/Estadisticas2004.htm>.
- MINISTERIO DE FINANZAS Y PRECIOS (2001) RESOLUCION No. 311-2001. ANEXO: SISTEMA TARIFARIO ELECTRICO.
- MORAN, M. J., AND SCIUBBA E., (1994) Exergy analysis: principles and practice. *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol: 116, 285– 290.
- NAREDO, J. M., Y VALERO A., (1999) *Desarrollo Económico y Deterioro Ecológico*, Madrid, Fundación Argentaria y Visor.
- NIKULSHIN, V., WU C., AND NIKULSHINA V., (2002) Exergy efficiency calculation of energy intensive systems. *Exergy, an International Journal*, Vol: 2, 78–86
- NILSSON, D. (1997) Energy exergy and emergy analysis of using straw as fuel in district heating plants. *Biomass and Bioenergy*, Vol: 13/12, 63–73.
- OCAÑA, V., C. QUINTANA, VILLEGAS, P., JÁUREGUI, S., (2002a) Estudio de la dispersión de gases contaminantes en el área de estudio. Proyecto ELANEM, group 5 UCLV. *COMEC 2002*. Santa Clara, Cuba, Samuel Feijó.

Bibliografía.

- OCAÑA, V., QUINTANA C. AND VILLEGAS P., (2002b) Determinación de la calidad ambiental en el campus de la Universidad Central de Las Villas, Cuba. *Avances en energías renovables y medio ambiente*. ASADES, Vol. 6.
- OCAÑA, V. S., DEWULF, J., QUINTANA, C., VAN LANGENHOVE, H., ROQUE, P. (2006a) Factores que influyen sobre la sostenibilidad energética de poblados aledaños a centrales azucareros. *Revista Centro Azúcar*.
- OCAÑA, V. S., DEWULF, J., QUINTANA, C., VAN LANGENHOVE, H., ROQUE, P. (2006b) Procedimiento para la cuantificación de la sostenibilidad energética en sistemas sociales vinculados a la producción azucarera. *Revista Centro Azúcar*.
- ODUM, H. T. (1971) *Environment, Power and Society*. Wiley Intersec. Publ., John Wiley. Nueva York.
- ODUM, H. T. (1983) *System Ecology: An Introduction*. John Wiley and Sons. New York.
- ODUM, T. H. (1996) *Environmental Accounting: Emery and Environmental Making*. Wiley. Toronto, Canada.
- OFICINA NACIONAL DE ESTADÍSTICAS. REPÚBLICA DE CUBA. (2002) *Anuario Estadístico de Cuba*. La Habana, Cuba.
- PÉREZ, R. (2005) Estudio termoeconómico del beneficio del gas de gasificación de biomasa en lecho fluidizado con fines energéticos. *Centro de Estudio de Termoenergética Azucarera (CEETA), Facultad de Ingeniería Mecánica*. Santa Clara, Cuba, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas (UCLV).
- PERROUX, F. (1984) *El desarrollo y la nueva concepción de la dinámica económica*. SERBAL / UNESCO. Barcelona, España.
- PILLIET, G., AND ODUM H. T., (1987) *Énergie, Écologie, Économie*, Georgia. Ginebra.
- PIMENTEL, D. P., M. (1974) Food production and energy crisis. *Science*, Vol: 182, pp. 443-449.
- PODOLINSKY, S. A. (1995) El trabajo del ser humano y su relación con la distribución de la energía. *Trad. M. Estapé, En “Los principios de la economía ecológica”*. Editado por J. Martínez Alier. Fundación Argantaria- Visor, Madrid.
- POREDOS, A., AND KITANOVSKI A., (2002) Exergy loss as a basis for the price of thermal energy. *Energy Conversion and Management*, Vol: 43, 2163–2173.
- RANZ, L. (1999) Análisis de los costes exergéticos de la riqueza mineral terrestre. Su aplicación para la gestión de la sostenibilidad. Zaragoza, España, Universidad de Zaragoza.
- RASKIN, J., ET AL., (1997) *Water Futures*. Stockholm Environment Institute. Stockholm.
- REISTAD, G. M. (1970) *Availability: concepts and applications*. Madison, Wisconsin, University of Wisconsin.
- ROQUE, P., WALL E. AND WALL G, (2003.) National exergy balance of Cuba: Pointing Towards a Time Sustainable Development. *International Conference Environment XXI Century - MAS XXI*. Santa Clara, Cuba, Editorial Feijó.
- ROSEN, M. A. (2002) Assessing energy technologies and environmental impacts with principles of thermodynamics. *Applied Energy*, Vol: 72, 427–441.

Bibliografía.

- SALAS, L. (2003) La huella Ecológica de Cantabria, España. *Conferencia Científico Internacional, Medio Ambiente Siglo XXI*. Universidad de la Villas, Santa Clara, Cuba, Editorial Feijó.
- SCIUBBA, E. (1999) Allocation of finite energetic resources via an exergetic costing method. In: Bejan, A., Mamut, E. (Eds.), *Thermodynamic Optimization of Complex Energy system. NATO Science Series*, Vol: 69,, Kluwer Academic Publishers, pp. 151–155.
- SCIUBBA, E. (2001) Beyond thermoeconomics? The concept of extended exergy accounting and its application to the analysis and design of thermal systems. *Exergy-An Int. J.*, Vol: 1 (2), in press.
- SEAGER, T. P., AND THEIS T.L., (2002) Exergetic pollution potential: estimating the revocability of chemical pollution. *Exergy International Journal*, Vol: 1- 10, (article in press, on line from April 2002).
- SIDDIQUI, A. S., FIRESTONE R., GHOSH S., STADLER M., EDWARDS J. L. AND MARNAY C., (2003a) Distributed Energy Resources with Combined Heat and Power Applications. Berkeley, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory University of California Berkeley.
- SIDDIQUI, A. S., FIRESTONE R.,GHOSH S., STADLER M. (2003b) Distributed energy resources customer adoption modeling with combined heat and power applications. IN ENVIRONMENTAL ENERGY TECHNOLOGIES DIVISION (Ed.) Berkeley, USA, Berkeley National Laboratory, University of California at Berkeley.
- SODDY, F. (1926) *Wealth, Virtual Wealth and Debt*. E.P. Dutton. New York.
- SODDY, F. (1995) *Economía cartesiana: la influencia de la ciencia física en la administración del estado*, Trad. por J. Martínez Alier. En “Los principios de la economía ecológica”, Madrid, Editado por J. Martínez Alier. Editorial Argenteria-Visor.
- SOLLNER, F. (1997) Analysis. A reexamination of the role of thermodynamics for environment economics. *Ecological Economics* Vol: 22, 175– 201.
- SOLOW, R. (1992) An Almost Practical Step Toward Sustainability. *Resources for the Future*. Washington.
- STEINBORN, W. A. S. Y. (2000) Entropy as indicator of sustainability in agro-ecosystems: North Germany case study. *Ecological Modelling*, Vol: 133, 2000.
- SZARGUT, J., MORRIS, D. R. AND STEWARD F. R. (1988) *Exergy Analysis of Thermal*, N.Y. USA, Springer-Verlag.
- TANATVANIT, S., LIMMEECHOKCHAI B. AND CHUNGPATIBULPATANA S.; (2003) Sustainable energy development strategies: implications of energy demand management and renewable energy in Thailand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol: 7, 367–395.
- TRAVERSA, A., MASSARDO A. F., CAZZOLA W., AND LAGORIO G., (2004) Widget-temp: a novel web-based approach for thermoeconomic analysis and optimization of conventional and innovative cycles. *Proceedings of ASME-IGTI TURBO EXPO 2004*. 14-17 JUNE 2004 VIENNA (AUSTRIA).
- TRIBUS, M., MCIRVINE, E.C. (1971) Energy and information. *Scientific American*, Vol: 225 (3), 179–188.
- TURRINI, E. (1999) *El camino del sol, un desafío para la humanidad a las puertas del tercer milenio. Una esperanza para los países el sur.*, La Habana, Cuba, CUBASOLAR.

Bibliografía.

- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1998) EP-42 Emission Factors, The Emission Factor and Inventory Group, U.S. Environmental Protection Agency. Disponible en internet en: www.epa.gov/ttn/chief/.
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (1998) EP-42 Emission Factors, The Emission Factor and Inventory Group, . U.S. Environmental Protection Agency. Disponible en internet en: www.epa.gov/ttn/chief/.
- ULGIATI, S., AND BROWN M.T, (1998) Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems. *Ecological Modelling* Vol: 108, 23– 36.
- UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAM (1991) Human Development Report 1991. New York, Oxford University Press.
- UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAM (2005) Human Development Report 2005. New York, Oxford University Press.
- VALERO, A., ET AL., (2004) Thermo-economic Philosophy Applied to the Operating Analysis and Diagnosis of Energy Utility Systems. *Int.J. Thermodynamics*, ISSN 1301-9724 Vol: 7, (No.2), pp.33-39.
- VELOZ, M. (2002) Petróleo estrategias, Resultados y Perspectivas. *El Economista de Cuba ONLINE*.
- VERDA., V. (2004) Thermo-economic Analysis and Diagnosis of Energy Utility Systems From Diagnosis to Prognosis. *Int.J. Thermodynamics*, Vol.7, (No.2), pp.73-83.
- VILLEGAS, P., OCAÑA V. AND QUINTANA C. (2004) Determination of the environmental quality of Central University of Las Villas. Cuba. *The Joint International Conference on "Sustainable Energy and Environment (SEE)"*. Hua Hin. Thailand.
- WACKERNEGEL, M., AND REES W. E. (1996) *Our Ecological Footprint: Reducing human impact on the earth.*, Gabriola Island, BC: New Society Publishers, ISBN: 1-55092-521-3.
- WALL, G. (1978) The Exergy Conversion in the Society of Ghana. Report, Physical Resource Theory, Chalmers, S-412 96 Göteborg. *The 1st International Conference on Energy and Community Development*. Athens, 10-15 July, 1978.
- WALL, G. (1986) *Exergy - a Useful Concept*, ISBN 91-7032-269-4 Chalmers Biblioteks Tryckeri Göteborg1986.
- WALL, G. (1987) Exergy Conversion in the Swedish Society. *Resources and Energy*, Vol: 9, pp. 55-73.
- WALL, G. (1990) Exergy conversion in the Japanese society, exergy, society, resource use. *Energy*, Vol: 15 n5, 435 - 444.
- WALL, G. (1991) Sverige/Japan - en skrämmande jämförelse (Sweden/Japan - a Frightening Comparison). *Den krackelerande välfärdsstaten*", November 5-6, 1991. Gävle, Sweden.
- WALL, G. (1993) Exergy, ecology and democracy-concepts of a vital society. In: Szargut, J. et al. (Eds.), *Presented at "ENSEC'93 International Conferens on Energy Systems and Ecology"*. July 5– 9, Cracow, Poland,.
- WALL, G. (1997) Exergy use in the Swedish society 1994. *Presented at TAIES'97 International Conference on Thermodynamic Analysis and Improvement of Energy Systems*. Beijing, China, June 10-13, Beijing World, Chinese Society of Engineering Thermophysics and American Society of Mechanical Engineers.

Bibliografía.

WALL, G. (2002) Conditions and tools in the design of energy conversion and management systems of a sustainable society. *Energy Conversion and Management*, Vol: 43, 1235–1248.

WEIDOU, N., AND JOHANSSON T. B., (2004) Energy for sustainable development in China. *Energy Policy*, Vol: 32, 1225–1229.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (1987) Our Common Future. *Conferencia de Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo*. MOPTMA, Madrid.

ZABALZA, I., ARANDA, A., SCALPELLINI, S., LÓPEZ, L.M. (2002) Sustainability analysis of urban areas based on energy and environmental costs. *Proceedings of ECOS (Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Aspects of Energy Systems and Processes)*. Berlin, Germany. July 3- 5 2002.

ZAFER, U., AND HEPBASLI A. , (2003) A study on the evaluation of energy utilization efficiency in the Turkish residential-commercial sector using energy and exergy analyses. *Energy and Buildings*, Vol: 35, 1145–1153.

ZHOU, J., MA S., AND HINMAN, W.G. (1996) Economic exergetic analysis: a new method for ecological energetic research. *Ecological Modelling*, Vol: 84, 291–303.

Anexo 1. Tablas de cálculos y resultados asociados a la aplicación del procedimiento propuesto al caso de la provincia de Villa Clara para el año 2002.

Tabla A- 1. Consumo de los portadores energéticos.

Portador	Sector	Unidad de medida	Cantidad	Exergía específica (kJ/kg)	Exergía (PJ)
Gas Licuado del Petróleo, GLP	Industria	kt	0.752	42068.99	0.032
Gas Licuado del Petróleo, GLP	Construcción	kt	0.029	42069.99	0.001
Gas Licuado del Petróleo, GLP	Agropecuario	kt	0.2	42070.99	0.008
Gas Licuado del Petróleo, GLP	Transporte	kt	0.022	42071.99	0.001
Gasolina Motor	Industria	kt	4.012	50434.92	0.202
Gasolina Motor	Construcción	kt	1.027	50435.92	0.052
Gasolina Motor	Agropecuario	kt	0.737	50436.92	0.037
Gasolina Motor	Transporte	kt	3.772	50437.92	0.190
Queroseno	Industria	kt	0.059	49724.75	0.003
Queroseno	Construcción	kt	0.007	49725.75	0.0004
Queroseno	Agropecuario	kt	0.007	49726.75	0.0004
Queroseno	Transporte	kt	0.014	49727.75	0.001
Gas Oil	Industria	kt	24.41	51382.89	1.255
Gas Oil	Construcción	kt	14.83	51383.89	0.762
Gas Oil	Agropecuario	kt	6.79	51384.89	0.349
Gas Oil	Transporte	kt	11.82	51385.89	0.608
Fuel Oil	Industria	kt	22.79	45290.64	1.032
Fuel Oil	Construcción	kt	20.57	45291.64	0.932
Fuel Oil	Agropecuario	kt	0.56	45292.64	0.025
Fuel Oil	Transporte	kt	0.17	45293.64	0.008
Nafta Industrial	Industria	kt	1.77	50434.92	0.089
Nafta Industrial	Construcción	kt	0	50435.92	0
Nafta Industrial	Agropecuario	kt	0	50436.92	0
Nafta Industrial	Transporte	kt	0	50437.92	0
Bagazo	Industria	kt	1209.29	9362.77	11.322
Bagazo	Construcción	kt	0	9363.77	0
Bagazo	Agropecuario	kt	0	9364.77	0
Bagazo	Transporte	kt	0	9365.77	0

Tabla A- 1. Consumo de los portadores energéticos (Continuación)

Portador	Sector	Unidad de medida	Cantidad	Exergía específica (kJ/kg)	Exergía (PJ)
Etanol desnaturalizado	Industria	Kt	0.0295	19923.56	0.0006
Etanol desnaturalizado	Construcción	Kt	0	19924.56	0.0000
Etanol desnaturalizado	Agropecuario	Kt	0	19925.56	0.0000
Etanol desnaturalizado	Transporte	Kt	0	19926.56	0.0000
Etanol desnaturalizado	Industria	GWh	235.73	0.0036	0.8487
Electricidad	Construcción	GWh	3.24	0.0036	0.0117
Electricidad	Agropecuario	GWh	10.81	0.0036	0.0389
Electricidad	Transporte	GWh	1.71	0.0036	0.0062

Tabla A- 2. Comportamiento del Indicador de Renovabilidad por sectores de la economía.

Sectores	Alfa
Industria	0.766
Construcción	0.000
Agropecuario	0.000
Transporte	0.000
Total	0.636

Tabla A- 3. Comportamiento del Indicador de limpieza de la exergía consumida por sectores de la economía.

Sectores	β
Industria	0.194
Construcción	0.082
Agropecuario	0.097
Transporte	0.089
Total	0.176

Tabla A- 4. Comportamiento del Indicador de auto satisfacción exergética de los sistemas de transformación.

Sectores	γ
Industria	0.109
Construcción	0.000
Agropecuario	0.001
Transporte	0.000
Total	0.083

Anexo 2. Tablas de cálculos y resultados asociados a la aplicación del procedimiento propuesto al caso de la República de Cuba para el año 2002

Tabla B- 1. Producción de energía primaria en Cuba, 2002 (tomado de: MEPLAN, 2005)

No	Portador	Unidad	Cantidad
1	Crudo	kt	3627.9
2	Gas Natural.	Mm ³	584.7
3	Hidroenergía	GWh	133
4	Leña	km ³	1969.6
5	Productos de la caña de azúcar	kt	9481.1
6	Bagazo	kt	8952

Tabla B- 2. D.2. Importación de energía primaria en Cuba, 2002 (tomado de: MEPLAN, 2005)

No	Portador	Unidad	Cantidad
7	Carbón	kt	26.2
8	Crudo	kt	1479.1

Tabla B- 3. Precios de los portadores de energía.(Beyond Petroleum, 2006)

p	Portador	Precio \$/t
1	Gas licuado del petróleo, GLP	600
2	Gasolina Motor	924
3	Queroseno	250
4	Gas Oil	560
5	Fuel Oil	450
6	Coque	31.7
7	Nafta Industrial	240
8	Aceites Lubricantes y Grasas (producto final)	567
9	Solventes	570
10	Gasolina Aviación	325
11	Turbo combustible	400
12	Carbón bituminoso	32.96
13	Carbón antracita	36.9
14	Coque de carbón	36.9
15	Bagazo	11
16	Productos de la caña	11
17	Leña	3
18	Carbón vegetal	100
19	Natural Gas	100
20	Gas manufacturado	100
21	Etanol desnaturalizado	38
22	Crudo	410.74
23	Hidroenergía(tarifa media de la electricidad en Cuba)	0.09
24	Energía eólica(tarifa media de la electricidad en Cuba)	0.09
25	Energía Solar Térmica	0
26	Energía Solar fotovoltaica (tarifa media de la electricidad en Cuba)	0

Tabla B- 4. Tarifa eléctrica por sector (MINISTERIO DE FINANZAS Y PRECIOS, 2001)

s	Sector	Tarifa	Tarifa	Dem. Registrada	Consumo Total (kwh)	Tarifa mensual (\$/kW)	Tarifa (\$/kWh)
1	Industria	A1	1	11271	9531800	3	0.042
1	Industria	M1A	2	16761	6355827	5	0.046
1	Industria	M1B	3	27631	5641090	5	0.048
1	Industria	M1C	4	4898	788540	5	0.044
1	Industria	M2B	5	448	105939	3	0.108
2	Construcción	M1B	3	5516	991884	5	0.048
2	Construcción	M1C	4	2704	577380	5	0.044
3	Agricultura	M1B	3	7894	1366539	5	0.048
3	Agricultura	M1C	4	703	126497	5	0.044
4	Transporte	M1A	2	442	144719	5	0.046
4	Transporte	M1C	4	1561	400050	5	0.044
4	Transporte	M2B	5	110	26120	3	0.108

Tabla B- 5. Factores de emisión (U.S. Environmental Protection Agency, 1998)

p	Resource	% Carbono	Unit	CO2	SOx	NOx	PM
1	Gas Natural		kg/Mm3	0.961	3.62E-06	4.48E-03	6.09E-05
2	Hidroenergía		kg/GWh	6600	0	0	0
3	Leña		kg/ton	1341	0.18	6.27	1.9
4	Bagazo		kg/ton	705.88	0	0.54	7.06
5	Carbón vegetall		kg/ton	1670.05	0	17.5	190
6	Etanol Desnaturalizado		kg/ton	1404.81	0	0	0
7	Gas Licuado del Petróleo, GLP		kg/Mm3	0.961	3.62E-06	0.00448	6.09E-05
8	Gasolina Motor	0.841	tn/tn	2.83	0.19	3.50	0.29
9	Queroseno	0.845	tn/tn	2.84	0.19	3.50	0.29
10	Gas Oil	0.854	tn/tn	2.87	1.49	3.41	0.28
11	Fuel Oil	0.849	tn/tn	2.85	9.98	4.07	2.54
12	Nafta Industrial	0.841	tn/tn	2.83	0.19	3.50	0.29
13	Energía Eólica		kg/GWh	7400	0.00	0.00	0.00
14	Energía Solar Térmica		kg/GWh	3600	0.00	0.00	0.00
15	Energía Solar Fotovoltaica		kg/GWh	5900	0.00	0.00	0.00