



ECO SOLAR

REVISTA CIENTÍFICA TRIMESTRAL DE CUBASOLAR



**REVISTA CIENTÍFICA de las
FUENTES RENOVABLES de ENERGÍA**

60

DIRECTOR GENERAL

Dr. Luis Bértiz Pérez

DIRECTOR

M.Sc. Manuel Álvarez González

EDICIÓN

M.Sc. Madelaine Vázquez
e Ing. Jorge Santamarina

CONSEJO EDITORIAL

Dr. Luis Bértiz Pérez
M.Sc. Manuel Álvarez González
Dr. Conrado Moreno Figueredo
M.Sc. Manuel Fernández Rondón
M.Sc. Daniel López Aldama

DISEÑO Y COMPOSICIÓN

D.I. Liodibel P. Claro Drake

WEB MASTER

Lic. Ernesto Nolasco Serna

RELACIONES PÚBLICAS

Mabel Blanco de la Cruz

CONSEJO ASESOR

Dra. Elena Vigil Santos
Dr. Conrado Moreno Figueredo
Dr. Sergio Corp Linares
Dr. José Guardado Chacón
Dr. Deny Oliva Merecio
Dra. Dania González Couret
Dr. Juan José Paretas
Lic. Bruno Henríquez Pérez
M.Sc. Leonor Turtós Carbonell
Lic. Ricardo Bértiz Valle
Dr. David Pérez Martín
Dr. César Cisnero Ramírez

Eco Solar, no. 60 / 2017

Revista científica de las
Fuentes Renovables de Energía
Abril-Junio, 2017
ISSN-1028-6004
RNPS-2220



CETER



DIRECCIÓN

Calle 20, No. 4113, e/ 18A y 47
Playa, La Habana, Cuba
TEL.: (53) 72040010; 72062061
E-MAIL: madelaine@cubasolar.cu
HTTP://www.cubasolar.cu



CONTENIDO

Los costos de la energía fotovoltaica (FV)	3
Daniel Stolik Novygrad	
Construcción de pequeño secador solar para uso doméstico y experimental	14
Noidys Quiros Martín y José Alberto Alfonso Pardo	
Actualización de metodologías para evaluación de externalidades atmosféricas asociadas a las centrales termoeléctricas cubanas	17
Elieza Meneses Ruiz, Alina Roig Rassi, Diosdado Alonso García, Ernesto Paz Ortega y Jorge Alvarado Cartaya	
Muestreo pasivo de contaminantes atmosféricos. Perspectiva de uso en Cuba	24
Janet Canciano-Fernandez, Mirtha Reinoso-Valladares, Yan Carlos Ordoñez-Sánchez, Dariela Valdés Placencia y Anel Hernández-Garces	
Evaluación cualitativa de la influencia del diseño arquitectónico en el ambiente interior	30
Dania González Couret, Luis Alberto Rueda Guzmán, Mónica Llovet Salazar, Nataly González Milián y Elizabeth Rodríguez García	
Externalidades atmosféricas de la quema de biomasa cañera	38
Alina Roig Rassi, Elieza Meneses Ruiz, Iveitty Soto Guevara, Diosdado Alonso García y Ernesto Paz Ortega	
Convocatorias	46

editorial
cubasolar

Los costos de la energía fotovoltaica (FV)

Por Dr. Daniel Stolik Novygrad*

*Dr. en Ciencias. Instituto de Materiales y Reactivos. La Habana, Cuba.

E-mail: dstolik@fisica.uh.cu

Resumen

Se analizan varios aspectos relacionados con los costos de la energía fotovoltaica (FV) como: cálculo del costo del kWh FV, costo nivelado, costo evitado, hardcost y softcost FV, costo de capital WACC, costos y precios del kWh de instalaciones de nivel «Utility» FV, evolución de costos y pronósticos fotovoltaicos, costos por sectores y por potencias, comparación de costos por tipos de fuentes y recuperación de costos por reciclaje.

Palabras clave: costos de la energía solar FV, costos de kWh eléctrico, hard y soft cost FV, WACC, evolución y pronósticos de costos y reciclaje FV.

Photovoltaic cost price

Abstract

Various aspects are analyzed related to the Photovoltaic energy cost price, like: Cost for electricity from solar PV, levelized PV cost, avoided PV cost, PV hard and soft cost, weighted average PV cost of capital, kWh price, forecast of PV cost, PV cost by sectors, PV installation utility cost, reduction cost tendency for each kWh FV, and PV cost recovery by components recycling.

Key words: PV cost, kWh electric cost, WACC, PV forecast cost, and PV recycling recovery.

Introducción

El elemento central en el costo FV es sin dudas el costo del kWh FV [Stolik, 2016b]. En un comienzo la FV no podía competir con la generación eléctrica de otras fuentes de generación eléctrica del MIX, pero paulatinamente en forma sostenida fue logrando una decisiva disminución de sus costos, que se concentran en la inversión inicial, definida como costo por potencia pico instalada (\$/kWp) o (\$/MWp) costos promedios FV que han variado con el transcurso del tiempo en dependencia de muchos factores como [Stolik, 2012a; Stolik, 2012b]:

- En qué, cómo y en cuánto se aplica.
- Costo de las componentes FV, celdas, módulos, inversores.
- Espacio extraterrestre o en superficie del planeta.
- Remoto aislado o en las inmediaciones de la red.
- Conectado o no conectado a red.
- Centralizado o descentralizado.
- Instalación de nivel utility, residencial, comercial, industrial o social.
- Sistemas experimentales o reales.
- Desde pequeñas potencias < 1kW, a plantas FV de cientos de MW.

- Radiación solar en dependencia del lugar, entre 750 y 2400 kWh/m²/año.
- Momento: anterior, actual o pronóstico futuro.
- Duración en años del sistema FV.
- Variantes de financiamientos.
- Conocimiento y experiencia alcanzados.

Cálculo del costo del kWh FV [Stolik, 2016c]

La fórmula para el cálculo del kWh durante toda la vida útil de una instalación FV es:

$$\text{Costo } (\$/\text{kWh}) = \frac{\$/\text{kWp}}{\text{kWh/kWp}} = \frac{\$}{\text{kWh}}$$

Donde:

\$/kWp: Costo total (inicial, posterior, costo de capital, etc.)

kWh/kWp: Horas pico que genera durante toda la vida útil que depende del nivel de radiación solar del lugar y tener en cuenta la degradación del módulo

En el numerador se suman todos los costos y gastos pero pueden existir otras compensaciones que se restan.

Costo nivelado [Stolik, 2016c]

Para el cálculo del costo del kWh de electricidad, sobre todo con fines de comparación entre distintas fuentes, se ha hecho uso y en ocasiones abuso de una importante herramienta para comparar el kWh obtenido de diferentes combustibles y fuentes, traducido del inglés como «costo nivelado» (LCOE–Levelized Cost of Electricity Energy), que define el costo del kWh promedio por vida útil de la instalación FV. Para ello se han utilizado distintas variantes de la misma fórmula, como:

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{M_{t,el}}{(1+i)^t}}$$

- I_0 : Erogación de la inversión inicial
- A_t : Costos anuales (O-M, comb...) en t
- $M_{t,el}$: Energía eléctrica producida t en kWh
- i : Tasa de descuento en %
- n : Años de vida útil del SFV
- t : Año correspondiente de 1, 2, ...n
- Otras variantes han sido:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad [€/kWh]$$

$$LEC = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

F_t : Costo explícito para el caso de fuentes como los combustibles

$$LCOE = \frac{Project\ Cost + \sum_{n=1}^N \frac{AO}{(1+DR)^n} - \frac{RV}{(1+DR)^n}}{\sum_{n=1}^N \frac{Initial\ KWh \times (1 - System\ Degradation\ rate)^n}{(1+DR)^n}}$$

AO : Valor residual que se recupera (Ej.: Reciclaje de muchas partes)

$$LCOE = \frac{PCI - \sum_{n=1}^N \frac{DEP}{(1+DR)^n} * TR + \sum_{n=1}^N \frac{LP}{(1+DR)^n} - \sum_{n=1}^N \frac{INT}{(1+DR)^n} * TR + \sum_{n=1}^N \frac{AO}{(1+DR)^n} * (1-TR) - \frac{AO}{(1+DR)^n}}{\sum_{n=1}^N \frac{Initial\ KWh \times (1 - System\ Degradation\ rate)^n}{(1+DR)^n}}$$

En las fórmulas se utilizaron distintas siglas para la tasa de descuentos $r = DR = i$.

PCI : Project Cost Investment Tax Credit (Costo proyecto menos deducción de la cuota)

DEP : Depreciación

TR : Tax Rate (tipo impositivo)

LP : Loan Payment (pago por préstamos)

INT : Interest Paid (desembolso por interés)

Costo evitado

Es complejo definir las variantes más económicas de las nuevas inversiones para el desarrollo generación eléctrica. Con relación a las fórmulas anteriores de LCOE, en la publicación PV Investor Guide «New business models for PV international markets» de agosto de 2014 en su página 20 se plantea [New business, 2014], (en traducción del inglés): «Es importante notar que este método es una abstracción de la realidad con el propósito de hacer comparables diferentes tipos de plantas generadoras y no apropiado para determinar la eficiencia de costo de una planta específica».

En otros trabajos [IEA, 2013; IEA, 2017] también se argumenta con respecto a la complejidad que representa el tomar decisiones de inversiones para la generación eléctrica, de acuerdo con la diversidad de factores que influyen. Para disminuir las limitaciones de los LCOE se propone complementarla con el análisis de «costo evitado» (LACE-Levelized Avoided Cost of Electricity) al que se puede acceder en IEA [2017]. Este elemento resulta muy lógico para determinaciones económicas ya que en parte depende de qué alternativas se quieren promover o sustituir, aspecto que depende grandemente de la distribución de componentes existentes del MIX, de cuáles son las bondades o problemas de las tecnologías que se plantean aplicar, si la solución es nacional o de importaciones y de las capacidades de energías primarias que se disponen, entre otros factores. Trataremos definir de la forma más concreta e integral los diversos elementos a tener en cuenta, relacionados con el posible desarrollo y aporte FV a la difícil problemática eléctrica, con el objetivo de ponerlos a disposición de los que toman decisiones y de los especialistas que tienen esta difícil tarea.

Cálculo explícito del kWh FV

En la FV, como hemos visto, el peso mayor lo tiene el costo inicial, lo que nos permite tratar de evitar las sumatorias de las fórmulas LCOE antes expresadas, Con el objetivo de ofrecer a los decisores una idea más explícita de los cálculos de dichos costos, teniendo en cuenta todos los factores que influyen, exponemos la fórmula siguiente (Fig. 1):



Fig. 1. Cálculo explícito del kWh FV.

Donde las componentes en forma más detalladas son (Fig. 2):

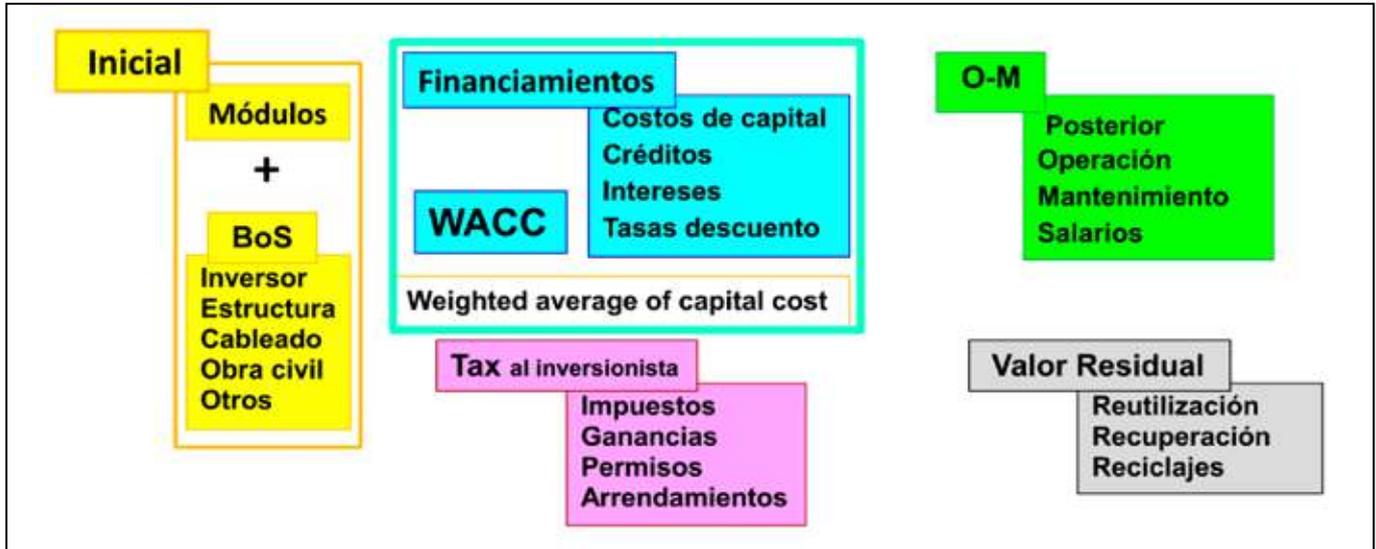


Fig. 2. Componentes para el cálculo.

En el numerador se suman:

- Todos los costos iniciales y posteriores (Módulos, Inversor, Estructura, Cableado, Obra civil, instalación y montaje, labor, etc.).
- Préstamos, créditos, otros Finanzamientos, tasas de descuento, otros del acápito WACC. por: Costos de capital, créditos,
- Operación y mantenimiento (O-M), que incluye salarios (para la FV son la O-M menor de todas las fuentes de generación eléctrica).
- Costos por imprevistos que incluyen los existentes por falta de experiencia del cliente receptor.

En el numerador se restan:

- Impuestos a pagar por el inversionista por ganancias, permisos, arrendamientos.
- Incentivos existentes en distintos países (la subvención mundial a los combustibles fósiles es mucho mayor que las de las FRE).
- Costos por reutilización, recuperación, reciclajes de partes de la instalación FV, sobre todo al final de la vida útil de la instalación FV.

En el denominador:

Se expresa el costo kWh/kWp Horas pico totales efectivas. Cuba que tiene una radiación promedio de 1825 kWh/m²/año, pero debido a la degradación paulatina de un 20 % del módulo, tomamos 1360 kWh/kWp x 25 años = 34 000 horas. Para zonas con distinta radiación este parámetro cambia.

Costos duros y costos blandos (hardcost y softcost) [Stolik, 2016]

Es muy útil agrupar en dos todos los elementos que determinan el costo total final de la instalación FV desde el costo inicial y durante toda la vida, sobre todo para las instalaciones de nivel «utility», denominados en el argot FV: 1. Hardcost (costos duros) y 2. Softcost (costos blandos) (Fig. 3).

El hard incluye todo lo relativo a equipamientos, dispositivos y partes de las instalaciones. En la imagen anterior se identifican (en verde) como EBOS-parte física eléctrica y SBOS-partes física mecánica. El total hard está dividido en:

Hard = Módulo (amarillo)+Inversor (naranja)+Otros hard (EBOS+SBOS, verde)

En el hard cost se hace una diferenciación de módulos e inversores por sus características más comunes en costos y prestaciones, quedando varios aspectos agrupados en «Otros hardcosts». La relación de las componentes por concepto de «Otros hardcost» (diferentes de módulos e inversores también del grupo «hard») es el siguiente:

- Cableado: Cables DC y AC, conectores, cajas de strings.
- Estructura: Sistemas de montaje, perfiles, fundamentos, materiales para estructuras, inversores y cajas de strings.
- Seguridad: Cercas, cámaras y sistemas de seguridad, equipamientos de protección y anti incendio.

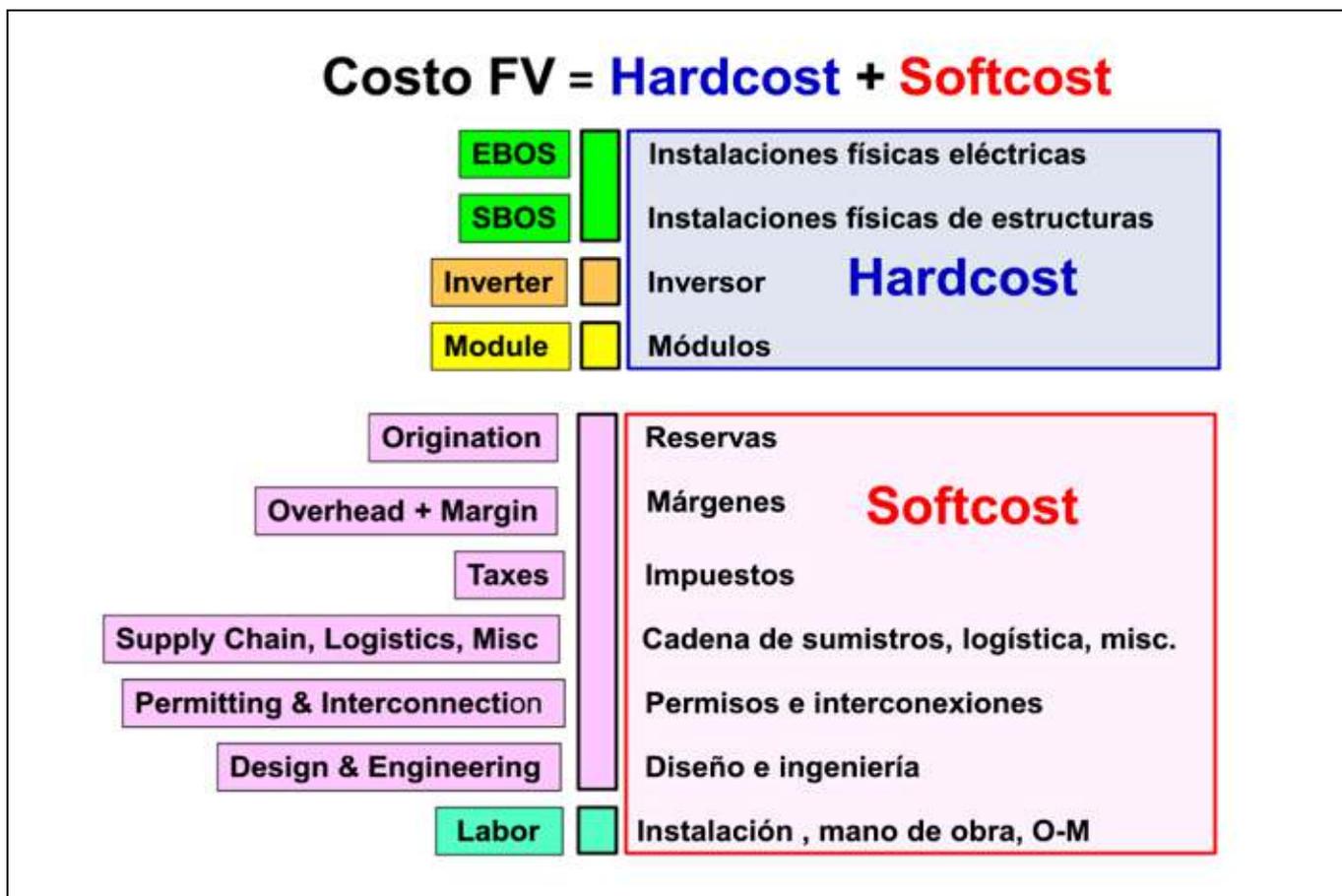


Fig. 3. Cálculo de costos duros y blandos.

- Conexión a la red: Cables y conectores, switch gears, pizarras de control, transformador, subestaciones.
- Sistemas de monitoreo y control, metrología, sensores de irradiación y de temperatura, sistemas de datos.

«Otros hardcosts» se diferencian mucho por países. Tomaremos los costos del sector utility en 10 países: Alemania, China, India, Chile, Reino Unido, Italia, Japón, Australia, Francia y EEUU, que suman más de 80 % de las instalaciones FV del mundo (Fig. 4).

Otros hardcost «utility» por países [Stolik, 2016g]

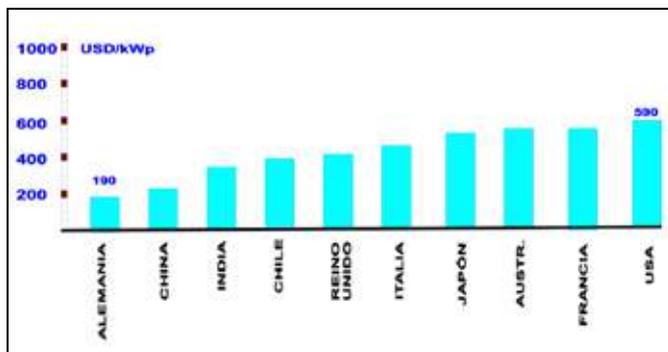


Fig. 4. Otros hardcost «utility» por países. Fuente: Irena Renewable Cost Database.

Nótese en el gráfico anterior que estos costos por países se diferencian desde 190 hasta 590 USD/kWp. Recalcamos

que para definir el «hardcost total» hay que añadir los costos del módulo y del inversor, partes del resto del hardcost.

El soft está relacionado directamente con lo que depende más de la actividad propia del hombre. Se divide en:

Softcost total = Labor o Instalación labor (azul) + Otros softcosts (rosados)

Ocasionalmente identifican Otros Soft como Softcost de Labor o como Restsoft.

Los costos se diferencian grandemente por países según veremos en la medida que desagreguemos las subcomponentes hard y soft.

Soft cost «utility»

Los costos de instalación están muy ligados a labor de operarios y especialistas, en Cuba, de hacerse bien, estos costos deben ser más bajos que en países más desarrollados económicamente y se compone de:

- Instalación mecánica. Construcción. Accesos. Trincheras para cableado. Instalación y montaje de estructuras, herrajes, módulos, inversores, conexión a red. Transporte de componentes y equipamientos.
- Instalación eléctrica. DC (módulos, cableado). AC. De sistemas de monitoreo-control. Mediciones de comprobación.
- Inspección. Supervisión constructiva. Inspección de salud y seguridad (Fig. 5).

Softcost instalación por países

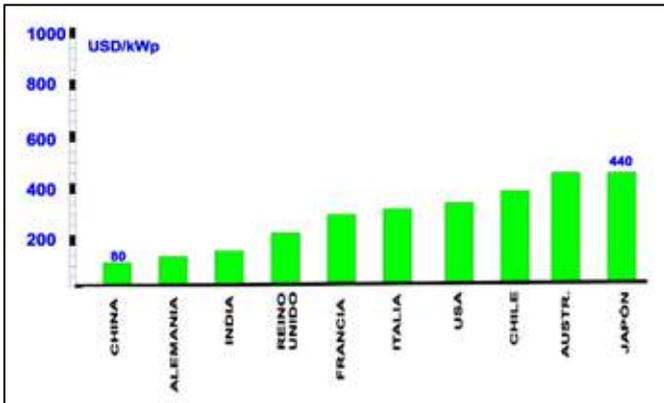


Fig. 5. Softcost instalación por países.

Nótese que los costos de instalación se diferencian desde 80 hasta 440 USD/kWp. Fuente: Irena Renewable Cost Database.

Otros softcost

La relación de sus acápites es la siguiente:

- Aplicación de incentivos: Todos los costos relacionados con el cumplimiento de los beneficios emanados de las políticas establecidas.
- Permisos: Todo tipo de autorizaciones para el desarrollo constructivo, de operación y regulaciones sobre el medioambiente.
- Diseños: Costos sobre concepto y detalles de los diseños. Costos de planificación y documentación. Costos de reconocimientos geológicos y de agrimensura.
- Adquisición de cliente: Costos de convencimiento al cliente de los proyectos. Costos (de existir) de derechos de proyectos. Pagos por derechos de aprobaciones locales.
- Costos financieros: Para el desarrollo, construcción y financiamiento del sistema FV.
- Margen: Para la empresa (o empresas) desarrolladora(s) del proyecto y construcción del sistema FV, incluyendo ganancias, riesgos, finanzas, servicios al cliente, aspectos legales, recursos humanos, rentas, suministros de oficina, gastos de servicios profesionales corporativos y de matrículas de transporte.

Restsoftcost por países

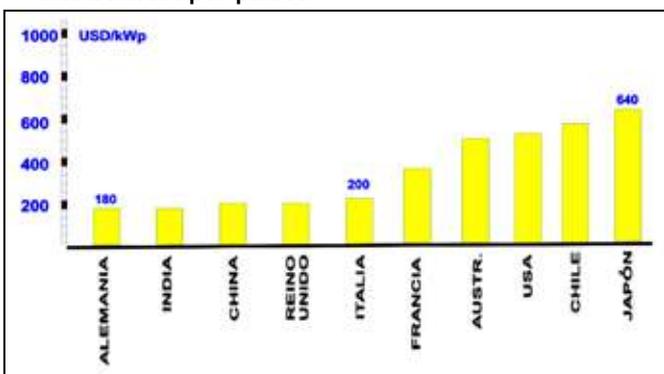


Fig. 6. Restsoftcost por países.

Nótese que los otros costos (restsoftcost) se diferencian desde 180 hasta 640 USD/kWp (Fig. 6). Fuente: Irena Renewable Cost Database.

Costos totales sin sumar módulos e inversores

Otros hardcost + Soft cost «utility» + Otros softcost

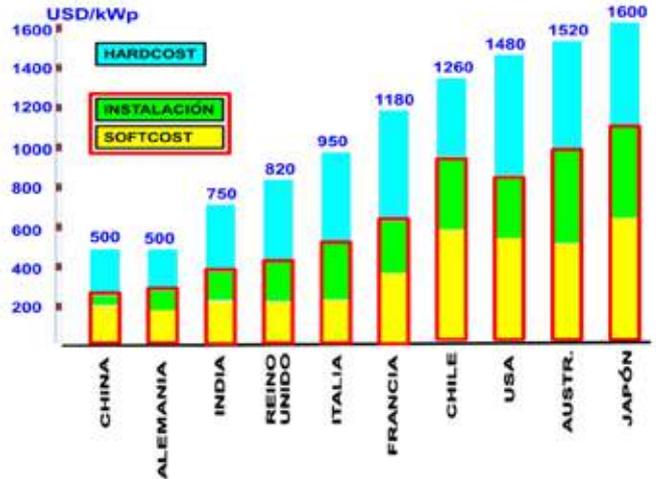


Fig. 7. Costos FV utility.

En la figura 7 se muestra la diversidad de costos FV «utility» sin sumar módulos e inversores, cuyos costos para módulos Si-poli e inversores utility centrales (> 500 y de 1000 kW) fluctúan también pero menos que otros hard y que el soft.

La suma de los dos tipos de soft se destaca en rectángulo de color rojo, donde se hace evidente que el costo soft tiene un gran peso en los costos totales, que van (según datos de Irena Renewable Cost Database) desde los más baratos en China y Alemania con 500 USD/ kWp hasta los más caros de Japón con 1600 USD/ kWp.

Es necesario destacar que para un país como Cuba es una gran oportunidad la posibilidad de asumir los «softcost» en moneda nacional para disminuir su aporte al costo total de por vida del sistema FV, aspecto que analizaremos en el capítulo de inversiones.

Costos totales hard + soft FV por países en el 2015

A la suma de todos los costos y gastos se incorporan los costos del módulo más el inversor FV. El precio del módulo spot en noviembre de este año 2017 estaba en algo menos de 32 centavos USD/Wp y el inversor central utility en menos de 6 cts/Wp, la suma de ambos es menor de 40 centavos/Wp a puerta de fábrica, las compras en grandes cantidades se acercan a este valor como es el caso de las grandes empresas inversionistas FV que compran grandes cantidades de insumos FV.

Supongamos muy aproximadamente (según diversas fuentes) que como promedio el precio del módulo más el inversor central sea de 54 cts/Wp (en rojo), que sumados al resto de hard (azul), mas instalación (verde) y más el resto de soft (amarillo) obtenemos los costos totales FV por países, muy baratos en China y Alemania (1130 USD/kWp), encareciéndose paulatinamente para otros países (Fig. 8).

Costo total del kWp FV por países de gran desarrollo FV

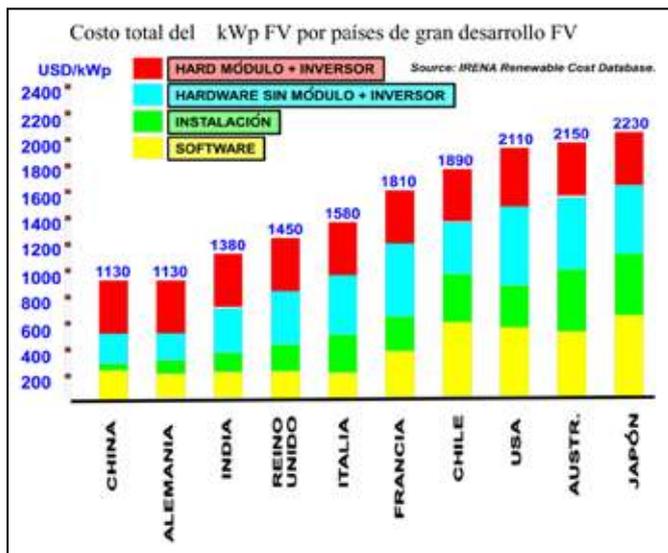


Fig. 8. Costo total del kWp FV por países de mayor desarrollo FV.

Al definir el costo del kWh hay que tener en cuenta la radiación solar promedio del lugar, region o país, por ejemplo en Australia dicha radiación es mucho mayor que la de Alemania.

Costo de capital WACC (Weighted Average Cost of Capital)

Con la disminución de los costos del sistema FV, sobre todo los hardcost, la componente de costos de capital se ha convertido en uno de los factores de mayores costos de las instalaciones FV. Veamos la influencia de los porcentajes habituales del WACC con tasas de intereses de 5, 7,5 y 10 % que origina sobre el porcentaje de todo el costo final de la instalación FV. Utilizamos el gráfico suministrado por Cleantechica, en el que podemos apreciar que 5 % de WACC origina 33 % del costo total del sistema FV, y un WACC de 10 % origina costos mayores al del resto de todos los demás costos hard y soft juntos (Fig. 9).

Aporte del WACC al costo del sistema FV [Solar Power, 2014]

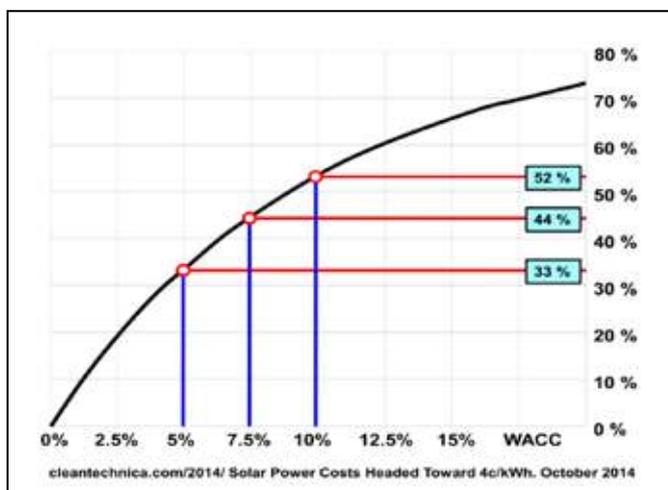


Fig. 9. Aporte del WACC al costo del sistema FV.

Es evidente la necesidad de disminuir al máximo posible en las inversiones el porcentaje del WACC haciendo un profundo análisis de las variantes existentes con la concurrencia de especialistas en economía en el tema.

Costos y precios del kWh utility FV [Stolik, 2016]

En el costo del kWh influye si incluye:

1. Solo costos de puesta en marcha inicial,
2. Gastos posteriores como de O-M, o
3. Si se tiene en cuenta hasta los pagos de intereses del WACC.

Evolución de los costos y pronósticos

Veamos costos y pronóstico de nivel utility hasta 2020 de la GTM [GTM, 2016].

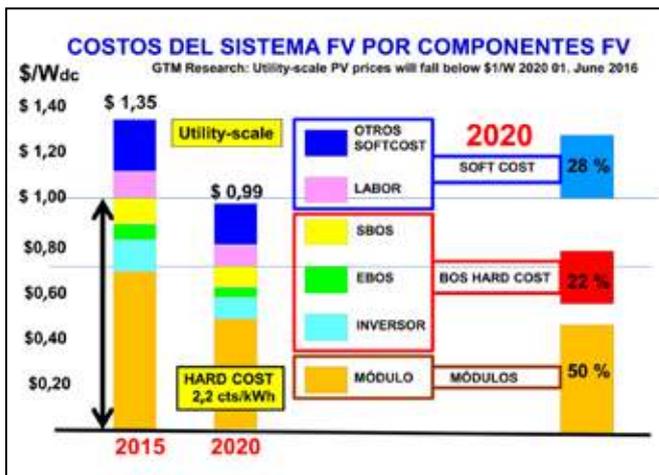


Fig. 10. Costos y pronósticos FV hasta 2020 de la GTM.

En la figura 10 se expresa el pronóstico de que los costos FV continuarán disminuyendo en los próximos años.

En la tabla 1, luego de un estudio sobre la evolución de los costos Hard, se expone un pronóstico que hemos elaborado en el caso de tener buenas prácticas para las instalaciones de nivel utility.

Tabla 1. Pronóstico de costos Hard en USD/kWpdc (sombreado en azul)

Año	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Dism.
sbos	110	95	90	85	80	75	32 %
ebos	70	60	55	50	45	45	36 %
inversor	100	80	70	60	55	50	50 %
modulo	590	385	320	300	290	280	52 %
TotalOTAL «HARD»	870	620	535	495	470	450	48 %

La columna sombreada en verde denota el porcentaje en que posiblemente disminuyan los respectivos costos hard entre 2016 y 2021. El costo total hard se expresa en rojo. Aunque la velocidad de disminución de los costos referidos se va haciendo menor, todavía en los próximos cinco años será notable, posteriormente los costos tenderán a ser más estables pero ya para ese entonces la energía eléctrica FV se habrá convertido en la más barata entre todas las fuentes.

Analicemos el aporte del hard al costo del kWh FV. Según la tabla anterior, es evidente que de continuar disminuyendo los costos parciales y total hard, entre 2017 y 2021 el costo del kWh (debido solamente al costo Hard) disminuirá, aspecto a tener muy en cuenta para la elaboración de la estrategia FV.

Es evidente que mientras los costos hard dependen fundamentalmente de construcción y adquisición de equipamientos e insumos (módulos, inversores, perfiles, cables, etc.), como hemos señalado, el costo soft se refiere a lo que depende mayormente del trabajo humano, elemento sumamente importante en función de lograr un mayor aporte nacional al financiamiento FV. Es en los Softcost donde están las mayores oportunidades.

Vimos la división del Softcost en dos partes, la que depende estrictamente del trabajo del hombre (Laborcost) y el softcost (Restsoftcost). Veamos un pronóstico sobre la evolución en los próximos cinco años en dólares por kWp (Tabla 2).

Tabla 2. Costos Soft en USD/kWpdc

Año	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Dism.
Laborcost	120	110	100	95	90	90	25 %
Restsoftcost	280	270	250	240	230	220	21 %
Total «Soft»	400	380	350	335	320	310	22 %

La columna sombreada de verde denota el porcentaje en que posiblemente disminuyan los respectivos costos Soft entre 2016 y 2021.

Para una radiación solar promedio como la de Cuba (tabla 3):

Tabla 3. Costo del kWh FV debido al soft cost

USD/kWpdc (Soft)						
Año	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Total soft	400	380	350	335	320	310
Centavos de USD/kWh (Soft)						
kWh/kWp de 25 años	1,17	1,11	1,02	0,98	0,94	0,91
kWh/kWp de 30 años	0,98	0,93	0,86	0,82	0,78	0,76

El aporte Soft sigue siendo importante por lo que hay que continuar disminuyéndolo.

Tabla 4. Costo total del kWp y del kWh FV debido al hard + soft

USD/kWpdc	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Dism.
Total «Hard»	870	620	535	495	470	450	48 %
Total «Soft»	400	380	350	335	320	310	22 %
Total Hard+Soft	1270	1000	885	830	790	760	40 %

De la tabla 4 se desprende que la disminución del hard en los próximos 5 años se pronostica mayor (48 %) que la del Soft (22 %).

El porcentaje del costo soft vs total final (hard+soft) aumenta, como se puede ver en la tabla 5, lo que sugiere

que a mediano plazo después del 2021 la disminución debe corresponder al soft:

Tabla 5. Evolución del costo total del kWh FV

USD/kWpdc (Soft)						
Año	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Soft/Total	31 %	38 %	39 %	40 %	40 %	41 %
Evolución del costo total del kWh FV						
Centavos de USD/kWh (Soft)						
kWh/kWp de 25 años	3,7	2,94	2,60	2,44	2,32	2,23
kWh/kWp de 30 años	3,11	2,45	2,17	2,03	1,93	1,86

En el 2016 las mejores prácticas de instalaciones FV a nivel utility hacían bajar el kWh FV a menos de 4 cts de USD, en el 2017 alrededor de 3 y teniendo en cuenta: la duración en 30 años, el aumento de las eficiencias, el incremento en volts del protocolo de CD de los próximos módulos FV, entre otros aspectos, dentro de unos 5 años, para los que logren incorporarse a las mejores prácticas FV, bajará de los 3 centavos de USD y tributar así a mayores alternativas para el difícil acápite del financiamiento.

En cualquier país los costos FV constituyen una banda de mínimos, máximos y promedios, que se diferencian por sectores y aplicaciones.

A continuación presentamos una relación aproximada en promedios de los mejores resultados de las mejores técnicas y prácticas que al respecto se han ido obteniendo en cada momento en el transcurso de 60 años, con el objetivo de dar la magnitud de la espectacular disminución de los costos FV, producto tanto del desarrollo científico técnico como de la producción de economía alcanzados (Tabla 6).

En las columnas se exponen en promedios muy aproximados, la época (año), los costos de instalación final FV en USD por kWp y los costos en USD del kWh de electricidad FV.

Tabla 6. Costos de instalación y del kWh

Año	USD/Wp	USD/kWh
	USD/kWp	USD/kWh
1955	\$ 1 500 000	\$ 45,00
1969	\$ 100 000	\$ 3,00
1978	\$ 50 000	\$ 1,60
1981	\$ 20 000	\$ 0,70
1987	\$ 10 000	\$ 0,30
19998	\$ 7000	\$ 0,22
2004	\$ 5000	\$ 0,15
2008	\$ 4000	\$ 0,12
2012	\$ 2000	\$ 0,07
2015	\$ 1500	\$ 0,05
	Pronóstico	Pronóstico
2020	\$ 1,00	\$ 0,03-\$ 0,04

Hoy en el 2017 los costos en USD/Wp para la mejores prácticas se acerca a los 1000 USD/Wp. Disminuirán algo más, posiblemente hasta menos de 1000 USD/kWp instalado y unos 3 cts/kWh en lugares de mayor radiación solar. En Cuba, de hacer bien las cosas podríamos llegar a bajar de 5 cts/kWh FV.

Costos por sectores y por potencias [Stolik, 2016a]

Hemos dado los valores de las instalaciones de nivel utility y he insistido en que el desarrollo FV depende de: características del país, experiencia alcanzada, niveles de radiación solar, costos logrados, financiamientos, intereses de los costos de capital, entre otros aspectos. En esta ocasión nos referiremos a comportamientos reales de los costos FV por sectores.

En primer lugar debemos recalcar que el costo de los sistemas FV disminuye cuando aumenta la potencia instalada. Veamos algunos ejemplos.

Para distintas potencias entre 1 y 1000 kWp

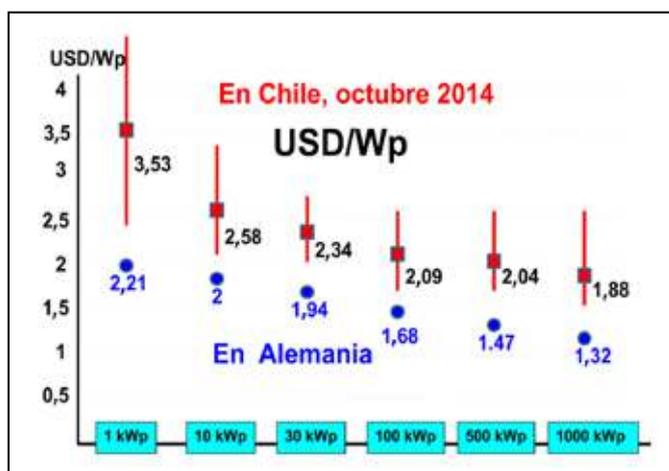


Fig. 11. Costos de Sistemas FV por Wp instalado en Chile y Alemania.

Veamos el ejemplo de Australia, país que más utiliza las instalaciones en techos residenciales (en noviembre 2015) para distintas potencias entre 1,5 y 10 kWp en techos (Tabla 7).

Tabla 7. Ejemplo de Australia

Potencia	1,5 kW	2 kW	3 kW	4 kW	5 kW	10 kW
Promedio USD/Wp	\$ 2,22	\$ 1,91	\$ 1,63	\$ 1,54	\$ 1,44	\$ 1,42

Otra vez se cumple la tendencia de la disminución de los costos FV con el aumento de la potencia de las instalaciones, inclusive para dentro del sector residencial.

La tendencia es general y se cumple también para instalaciones de grandes parques FV.

Tabla 8. Disminución del costo por pago en PPA en parques FV de EE.UU. en centavos de USD por kWh FV generado entre 2009 y 2015

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Máximo	39,4	27	16,6	14,9	10,4	8,6	7
Mínimo	32,3	22,6	14,8	10,1	9,1	7,2	5,8

Tabla 9. Costos del kWh eléctrico de distintas fuentes, en instalaciones FV en parques y techos por distintos sectores de consumo eléctrico en 2015

Centavos de USD/kWh	Instalaciones FV en:
De 5,8 a 7	Parques FV
De 7,8 a 13,6	Techos sociales
De 10,9 a 19,3	Techos en industrias y comercios
De 18,4 a 30	Techos residenciales

Tabla 10. Precios (USD/Wp) de sistemas FV en algunos países en el 2013 [Stolik, 2016a]

	China	Francia	Alemania	Italia	Japón	Reino Unido	EE.UU.
Residencial	1,5	4,1	2,4	2,8	4,2	2,8	4,91
Comercial	1,4	2,7	1,8	1,9	3,6	2,4	4,51
Utility	1,4	2,2	1,4	1,5	2,9	1,9	3,31

Nótese a continuación la relación de costos entre residencial y utility (Tabla 11).

Tabla 11. Relación de costos entre residencial y utility

Residencial / utility	1,07	1,86	1,71	1,86	1,45	1,5	1,5
-----------------------	------	------	------	------	------	-----	-----

Los records de costos más bajos del kWh llegan hasta ser de unos 2,5 centavos /kWh FV [Stolik, 2016h] a lo que nos referiremos en el capítulo de inversiones.

Veamos más ejemplos de relación de costos en distintos sectores (Fig. 12):

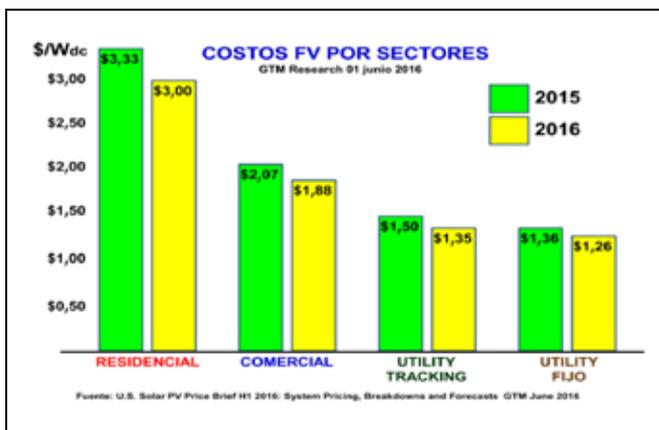


Fig. 12. Relación de costos en distintos sectores.

Nótese la gran diferencia de los costos por sectores, en el extremo más barato el nivel de utility fijo y con más del doble el residencial. Los costos seguirán disminuyendo.

Por ejemplo, de acuerdo con IEA en EE.UU. en el primer trimestre del 2017 [IEA, 2016] el residencial se situaba en \$ 2,84/Wdc (1,7 % menos vs primer trimestre 2016), el no residencial en \$ 1,56/Wdc (4 % menos us. 2016), el utility con seguimiento en \$1,08/Wdc (5,9 % menos vs. 2016) y el utility fijo en \$0,99/Wdc (6,2 % menos vs. 2016). Todos disminuyen, el utility fijo más rápidamente.

En mayo del 2016 el NREL planteaba (Fig. 13) [NREL, 2017]:

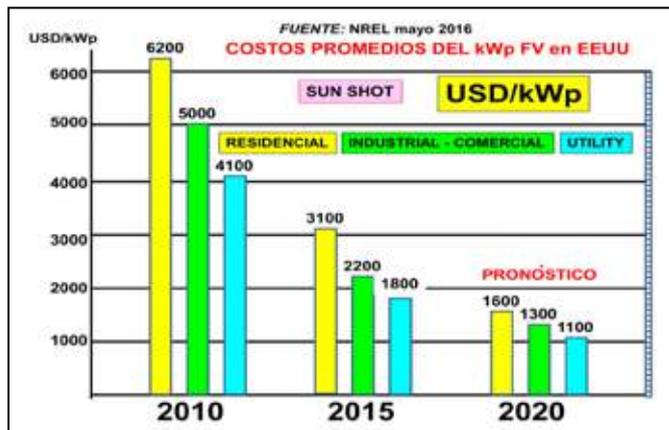
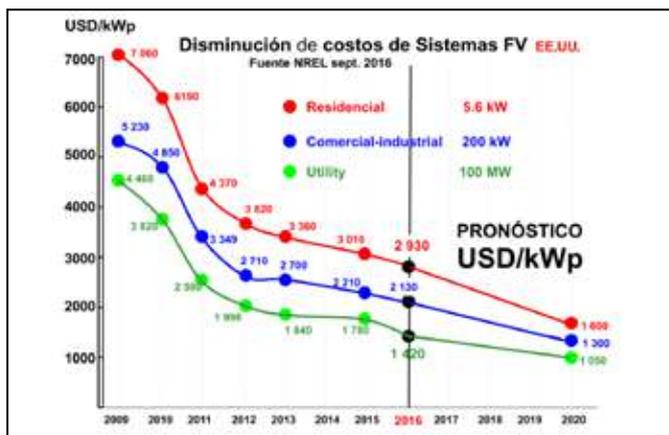


Fig. 13. Costos promedios del kWp FV en EE.UU.

No obstante algunas diferencias entre distintos datos de costos en dependencia de quién hace los cálculos y los estimados, la coincidencia del abaratamiento continuo es la misma. La disminución para utility fijo entre 2009 y 2016 ha sido (Figs. 14 y 15):



Figs. 14 y 15. Disminución para utility fijo entre 2009 y 2016.

El pronóstico es que el costo en todos los sectores continuará disminuyendo, con una diferencia que se irá manteniendo pero más estrecha.

Todas las componentes del sistema aportan a la disminución de los costos totales FV (Fig. 16).

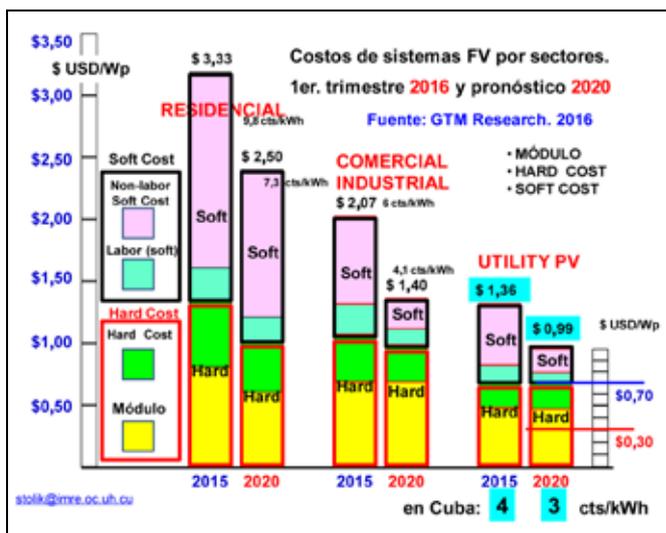


Fig. 16. Aportes de las componentes del sistema a la disminución de los costos totales.

Hoy en el 2017 podemos afirmar que los costos en USD/Wp para la mejores prácticas se acerca a los 1000 USD/Wp. Disminuirán algo más, posiblemente hasta menos de 1000 USD/kWp instalado a unos 3 cts/kWh en lugares de mayor radiación solar. En Cuba, de hacer bien las cosas, podríamos llegar a bajar de 5 cts/kWh FV.

Comparación de costos por tipos de fuentes

Otro elemento importante para tomar decisiones, sobre todo relacionado con el costo evitado LACE (Levelized Avoided Cost of Electricity), es la diferencia de costos del kWh y de las instalaciones kW entre las distintas fuentes de generación eléctrica. Este elemento se debe definir en cada país teniendo en cuenta sus características y posibilidades; no obstante, es importante conocer cómo es el comportamiento mundial promedio y también en otros países de mejores prácticas FV que han chocado indistintamente con retos y posibilidades, con experiencias que pueden ser aprovechadas o desechadas para el desarrollo FV concreto del país. Comparemos los costos del kWh en 2016 para distintas fuentes de generación eléctrica (Fig. 17) [Lazard's Levelized, 2016].

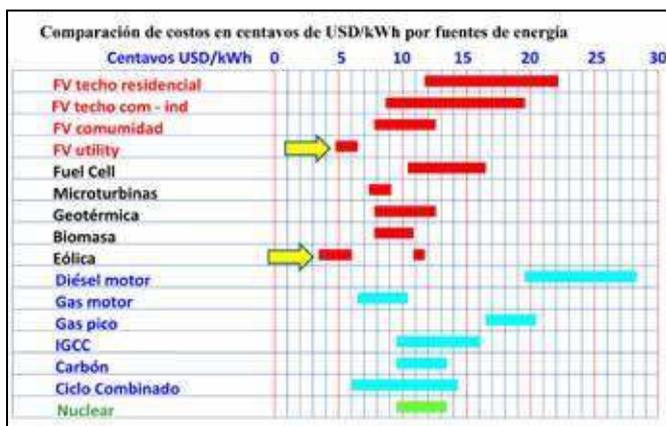


Fig. 17. Comparación de costos en centavos de USD/kWh por fuentes de energía.

Tabla 12. Rangos de costos por fuentes

Fuente	Sin subsidio Cents. USD/kWh		Con subsidio Cents. USD/kWh	
	mínimo	máximo	mínimo	máximo
FV techo residencial	13,8	22,2	10,5	16,8
FV techo com.-ind.	8,8	19,3	6,8	15
FV comunidad	7,8	13,5	6,2	10,8
FV utility	4,9	6,1	3,9	4,9
Fuel Cell	10,6	16,7	9,4	14,3
Microturbinas	7,6	8,9	7,4	8,6
Biomasa	7,7	11	6	10
Eólica	3,2	6,2	1,4	4,8
Geotérmica	7,9	11,7	-	-
Diésel motor	21,2	28,1		
Gas motor	6,8	10,1		
Gas pico	16,5	21,7		
IGCC	9,4	21		
Carbón	6	14,3		
Ciclo Combinado	4,8	7,8		
Nuclear	9,7	13,6		

Fuente: Lazard's leveled cost of energy analysis—version 10.0. dic . 2016.

En la figura 17 y la tabla 12 se muestran los rangos de costos, muy a favor de la eólica y la FV. Los costos dependen de distintos factores, en la FV por el nivel de radiación solar y en la eólica por las velocidades de los vientos, entre otros factores. También cuentan las diferencias de costos fijos y variables.

Veamos la comparación de los costos de capital que hay que invertir de por vida en las distintas fuentes.

Tabla 13. Costos de inversión total por fuentes

Fuente	USD/kW	
	mínimo	máximo
FV techo residencial	2000	2800
FV utility	1300	1450
Fuel Cell	3800	7500
Microturbinas	2500	2700
Biomasa	2500	4000
Eólica	1250	1700
Eólica off shore	3625	3625
Geotérmica	4250	6400
Diésel motor	500	800
Gas motor	650	1100
Gas pico	800	1000
IGCC	4000	14 500
Carbón	3000	8400
Ciclo Combinado	1000	1300
Nuclear	5400	8650
Nuclear	9,7	13,6

Fuente: Lazard's leveled cost of energy analysis—version 10.0. dic. 2016.

Se muestran cómo han bajado los costos de capital de la eólica y la FV, los que continuarán disminuyendo algo más. Veamos otro análisis de la IEA al respecto.

Recuperación de costos por reciclaje de módulos [Sto-lik, 2016e]

Vimos que la duración de las instalaciones FV se aproxima a 30 años, con bajos costos de mantenimiento e inclusive

Tabla 14. Costos totales en USD/MWh por tipos de plantas eléctricas [EIA, 2017]

Planta tipo	Factor Capacidad (%)	Costo Capital	O&M fijo	O&M Variable	Inversión transmisión	Costo total	Tax credit	Total con Tax credit
Ciclo (CC)	110	95	90	85	80	75		32 %
Combinado	87	14,0	1,4	42,0	1,1	58,6	NA	58,6
Ciclo comb,	100	80	70	60	55	50		50 %
avanzado	87	14,0	1,3	37,5	1,0	53,8	NA	53,8
Turbina Combustión	30	36,8	6,6	54,3	3,0	100,7	NA	100,7
Turbina com. avanzada	30	22,8	2,6	58,8	3,0	87,1	NA	87,1
Nuclear avanzado	90	70,8	12,6	11,7	1,0	96,2	NA	96,2
Geotérmica	90	29,2	13,3	0,0	1,5	44,0	-2,9	41,1
Biomasa	83	47,2	15,2	34,2	1,2	97,7	NA	97,7
Eólica onshore	41	39,8	13,1	0,0	2,9	55,8	-11,6	44,3
Solar FV	25	59,8	10,1	0,0	3,8	73,7	-15,6	58,1
Hidroeléctrica	60	54,1	3,1	5,2	1,5	63,9	NA	63,9

Fuente: EIA, U.S. Energy Information Administration Levelized Costs April 2017.

al final de su vida útil se puede recuperar en un porcentaje relativamente alto de la inversión inicial. Se plantea que gracias a innovaciones tecnológicas se puede recuperar más de 90 % de algunos metales (ferrosos y no ferrosos), semiconductores, otros materiales y del vidrio. En otra ocasión analizaremos las oportunidades de la disminución de los costos FV.

Conclusiones

Este análisis de costos FV es imprescindible para abordar la problemática de las inversiones FV a definir en una estrategia de desarrollo FV.

Bibliografía

- CLEANTECHNICA.COM/2014/ Solar Power Costs Headed Toward 4c/kWh. October 2014.
- EIA, U.S. Energy Information Administration | AEO2017. Levelized Costs April 2017.
- GTM RESEARCH: Utility-scale PV prices will fall below \$1/W 2020 01. June 2016.
- IEA (2013). «Assessing the Economic Value of New Utility-Scale Electricity Generation Projects», July 2013.
- IEA (2017). «EE.UU. Q1».
- IEA (2017). Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook. April 2017.
- Lazard's levelized cost of energy analysis—version 10.0. Dic. 2016. «New business models for PV international markets». Agosto de 2014 en su pág. 20. NREL, USA, mayo 2016.
- RENEWABLE ENERGY FOCUS (2009). «End-of-life PV: then what? - Recycling solar PV panels» (en inglés). 3 de agosto de 2009.
- STOLIK, D. (2012a). «100 preguntas y respuestas sobre energía FV». 1ra parte *Energía y Tú* No. 58. Abri-jun 2012. La Habana: Ed. Cubasolar.
- STOLIK, D. (2012b). «100 preguntas y respuestas sobre la energía FV» 2da parte *Energía y Tú* 59. Jul -sept 2012. La Habana: Ed. Cubasolar.
- STOLIK, D. (2016a). «Costos de la FV por sectores». Boletín UNE, FV No. 9, abril, 2016.
- STOLIK, D. (2016b). «La impresionante evolución del costo del kWh FV». FV No. 18, junio, 2016).
- STOLIK, D. (2016c). «Cálculo del costo del kWh FV». Boletín UNE. FV No. 26, junio 2016.
- STOLIK, D. (2016d). «Encadenamientos económicos posibles de la FV en Cuba». FV No. 28, julio, 2016.
- STOLIK, D. (2016e). «El reciclaje FV». FV No. 32, agosto 2016.
- STOLIK, D. (2016f). «Costos utility FV en próximos años». FV NO. 33 Boletín UNE, sept. 2016.
- STOLIK, D. (2016g). «El costo hard y soft por países». FV NO. 35, Boletín UNE, sept., 2016.
- STOLIK, D. (2016h). «Costos y precios del kwh “utility”FV». FV No. 36 Boletín UNE, Sept., 2016.
- U.S. SOLAR PV PRICE BRIEF H1 2016: System Pricing, Breakdowns and Forecasts GTM June 2016.
- WADE, A. ET AL. (2016). Irena 2016 and IEA-PVPS 2016. End of life management solar PV panels.



Construcción de pequeño secador solar para uso doméstico y experimental

Por M. Sc. Noidys Quiros Martín* y M. Sc. José Alberto Alfonso Pardo**

* Máster, Ing. Mecánica y Profesora Asistente de la Universidad de Ciego de Ávila, Cuba.

** Máster, Ing. Mecanización Agrícola y Profesor Auxiliar de la Universidad de Ciego de Ávila, Cuba.

E-mail: noidys@unica.cu

Resumen

El ahorro energético y el uso de alternativas sostenibles son políticas fundamentales en nuestro país; debido a ello la ciencia y la técnica se encaminan a solucionar diferentes necesidades del hombre, como es la conservación de alimentos, a través del deshidratado de productos agrícolas. La construcción de un secador solar, mediante el diseño y uso de materiales que posean las propiedades físico-mecánicas para realizar la función de aislar el calor en la cámara de secado deviene objetivo de este trabajo. Al ser construido se efectúan dos experimentos; primero se expone el aparato en vacío a la radiación solar, para obtener temperaturas específicas y se comparan con otras bibliografías; en el segundo, se coloca en la cámara de secado el producto de prueba, en este caso el plátano, para obtener la calidad del material final y el rendimiento del aparato. Ello da como resultado que puede alcanzar las temperaturas exigidas para el deshidratado, con un producto final de calidad y alta eficiencia de secado, sin usar ningún tipo de energía convencional. Con su uso en la experimentación de otros productos agrícolas, se obtiene un ahorro energético favorable y sobre todo deviene recurso medioambiental.

Palabras clave: ahorro, energía, renovables, solar, alimentos.

Construction of a small solar dryer for domestic and experimental uses

Abstract

Energy saving and the use of sustainable alternatives are fundamental policies in our country; Due to this, science and technology are directed to solve different needs of man; as it is the conservation of foods, through the dehydration of agricultural products. The construction of a Solar Dryer; by designing and using materials that have the physical-mechanical properties to perform the function of isolating the heat in the drying chamber, is the goal of this work. Two experiments are carried out: the first the vacuum apparatus is exposed to solar radiation, to obtain the temperatures that are reached and compared with other bibliographies. In the second, the test product is placed in the drying chamber in this case of the Banana to obtain the quality of the final material, performance of the apparatus; resulting in that it can reach the temperatures required for dehydration, with a final quality product and high drying efficiency, without using any conventional energy and thus with the use of it for the experimentation of other agricultural products you get a savings favorable energy and above all is an environmental resource.

Key words: saving, energy, renewable, solar, food.

Una propuesta de ahorro energético para el secado de productos alimenticios

En la actualidad se reconoce mundialmente la necesidad de un ahorro energético y la búsqueda de alternativas para poder disminuir la explotación de combustibles fósiles y las afectaciones que provocan al medioambiente.

El ahorro energético y el uso de alternativas sostenibles son esenciales para nuestro país, debido a no existir los recursos suficientes para satisfacer todas las necesidades.

Nuestro planeta percibe en su superficie la energía del Sol en forma de luz y calor, responsables de los procesos vitales como el día y la noche, la fotosíntesis, las mareas, los vientos, las estaciones del año y en sí la vida de los seres que la habitan.

A lo largo y ancho de nuestro país hay suficiente radiación solar todos los meses por encontrarse cercano al trópico de cáncer, y a pesar de los días nublados y lluviosos siempre puede aprovecharse un determinado porcentaje de radiación solar.

En casa en ocasiones se procura deshidratar productos para su uso o almacenamiento, como por ejemplo el plátano; al ser secado se procesa para hacer la bananilla, una receta que se les prepara a los bebés; también hacer tostadas de pan para su consumo o almacenar; otra función para descongelar alimentos y hasta darle un previo asado, y así se nos pueden ocurrir muchas pequeñas tareas en casa y experimentar con frutos, plantas y semillas para su almacenamiento y conservación.

Existen diferentes técnicas para efectuar el secado de productos alimenticios como el secado solar tradicional, secado solar técnico y secado convencional (mediante equipos industriales). En todos estos casos el proceso consiste en entregar una cierta energía al producto para eliminar el agua que contiene. El secador solar que se construye mediante la forma y los materiales aquí propuestos permite alcanzar temperaturas entre 40 °C a 60 °C (Fig. 1).



Fig. 1. Secador solar doméstico.

¿Cómo construirlo?

El principio básico es calentar el aire dentro de una cámara, disminuir la humedad relativa con el aumento de la temperatura y extraer agua del producto.

Materiales a utilizar en la cámara de secado

Los materiales propuestos se buscan de manera que sean accesibles, de bajo costo; pero a la vez que cumplan con las propiedades físico-mecánicas necesarias para garantizar el funcionamiento.

1. Para calentar la cámara de secado se utiliza el papel de aluminio como un almacén de energía de 15 kWh/Kg; sus propiedades hacen del aluminio un metal provechoso por su ligereza, resistencia a la corrosión, buen conductor de calor, no es magnético ni tóxico, buen reflector de luz y muy dúctil.
2. Para lograr el aislamiento térmico se compacta una pared compuesta por cartulina, poliespuma y cartón prensado (de bagazo) como se muestra en la figura 2, pues todos presentan una baja conductividad térmica.

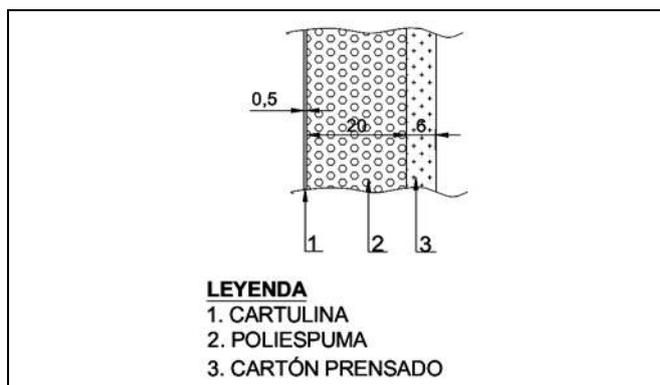


Fig. 2. Pared aislante.

3. Para la reflexión de los rayos solares se usan dos láminas de vidrio, DVH (Doble Vidriado Hermético); el vidrio tiene propiedades ópticas selectivas pues deja pasar casi toda la radiación solar y es opaca a la radiación infrarroja emitida por el absorbedor; en este caso se proponen dos láminas separadas por una cámara de aire de 12 mm, para garantizar una mayor efectividad en el efecto invernadero.
4. Pintura negra como cuerpo absorbedor.

Materiales auxiliares

Para la construcción del Secador Solar se utilizan listones de madera, tirafondos, pegamento y grapas, y por herramientas martillo, sierra, tijeras, calador, taladro y brochas.

Forma y dimensión técnica

En la figura 3 se muestran los planos del diseño técnico: un cubo rectangular de 400 mm de altura posterior, 560 mm de altura frontal, 810 mm de longitud y 530 mm de ancho; como se aprecia la tapa es de vidrio DVH, inclinada para captar de forma eficiente la radiación solar.

Metodología para la construcción

1. Se elabora la marquetería de madera según las dimensiones técnicas; esta puede ser de cedro u otra madera fácil de trabajar.
2. Se fabrican las paredes, puerta de entrada y fondo, se adhiere con pegamento la cartulina a la poliespuma y esta al cartón de bagazo, formando la capa de material aislante según se muestra en la figura 2.

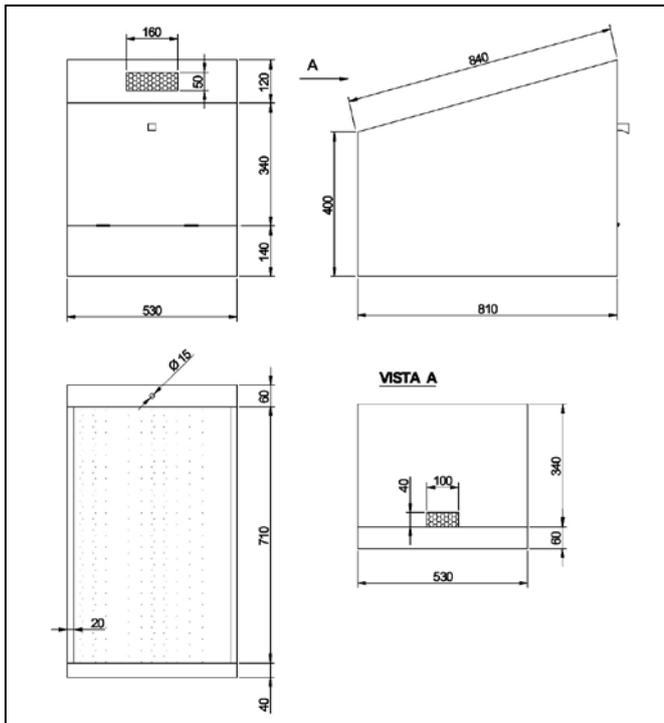


Fig. 3. Planos del secador solar.

3. Se construyen los agujeros rectangulares en el frente y posterior con las dimensiones definidas para la circulación del aire.
4. Pegar el papel de aluminio en el interior en las paredes.
5. Pintar de negro toda la superficie interior.
6. Después de secada la pintura y compactadas las paredes, se montan las paredes en la marquetería.
7. Se introducen las láminas de vidrio con mucho cuidado y se hermetiza.
8. Se coloca la puerta y se fijan dos listones en cada pared lateral para soportar la parrilla de los productos a secar.
9. Es conveniente disponer de un termómetro para controlar la temperatura dentro del secador
10. Al finalizar se aplica una pintura de color a gusto para conservar el cartón de la humedad ambiental como se puede ver en la figura 4.



Fig. 4. Secador solar.

Comentarios finales

Aprovechar la energía solar no es sino lo que la Naturaleza ha venido realizando desde siempre, siendo las energías eólica, hidráulica, la biomasa y otras, manifestaciones indirectas de la energía solar.

Los materiales propuestos en la construcción propuesta poseen las propiedades físico-mecánicas que permiten alcanzar las temperaturas requeridas y asegurar el aislamiento térmico dentro de la cámara de secado.

El secador garantiza la temperatura y calidad requerida del producto final para su posterior uso.

Advertencia

Al abrir la puerta del secador su operador no se debe situar frente al equipo, sino a un costado, y esperar unos minutos para evitar quemaduras por el vapor que libera la cámara.

Bibliografía

- ALEMANY GUTIÉRREZ, EDMUNDO (2008). «Calentadores solares se suman a la Revolución Energética». En Guerrillero, Pinar del Río, 26 de febrero de 2008. Página Web. <http://www.guerrillero.co.cu/018020/0144.htm>
- ARAYA, O. (2005). Alternativas de industrialización del banano y el plátano. San José, CITA-UCR.
- BÉRRIZ LUIS Y D. DEÁS (1990). Secador solar de madera. CIES, Comisión Nacional de Energía. BÉRRIZ LUIS (2007). Manual de secadores. La Habana: Ed. Cubasolar.
- COLECTIVO DE AUTORES (1997). Manual del secado solar técnico de alimentos. Cochabamba.
- CORP LINARES, SERGIO (1998). «Diseño de secadores solares». Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas. La Habana: ISPJAE.
- DELGADO GONZÁLEZ, MARÍA DEL CARMEN, ET AL. (2005). «Familia de secadores solares SecSol». Página Web. <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia30/HTML/articulo02.htm>
- EL BLOG DE LA METALURGIA. Usos y propiedades del aluminio. 2007. Página Web. <http://www.blogmetalurgia.com/2007/10/01/ usos-y-propiedades-del-aluminio/>
- FULLER, R. J. (1993). «Solar Drying of Horticultural Produce: Present Practice and Future Prospects». Postharvest News and Information 4 (5): 131N-126N. 1993
- RIERA, LILLIAM (2008). «Cuba instala calentadores solares de agua de tubos al vacío». Digital Granma Internacional. La Habana, 17 de abril del 2008. Página Web. <http://www.granma.cu/espanol/2008/abril/jue17/16santovenia-e.html> Textos Científicos. com. Energía Solar, 2008. Página Web. http://www.erpt.net/html/energia_solar.html
- TURRINI ENRICO (2006). *El Camino del Sol*. La Habana: Ed. Cubasolar, Universidad Nacional de Ingeniería (Lima – Perú), Facultad de Ciencias. Secadores Solares, 27 de Marzo de 2001. Página Web. <http://fc.uni.edu.pe/optica/secadosolares.html>

Actualización de metodologías para evaluación de externalidades atmosféricas asociadas a las centrales termoeléctricas cubanas

Por M. Sc. Elieza Meneses Ruiz*, Lic. Alina Roig Rassi*, M. Sc. Diosdado Alonso García*, M. Sc. Ernesto Paz Ortega* y Lic. Jorge Alvarado Cartaya*.

*Especialistas del Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía. Cubaenergía; 20 No. 4111 entre 18ª y 47, Playa; La Habana.

E-mail: emeneses@cubaenergia.cu

Resumen

El presente trabajo constituye una actualización en las metodologías de estimación de los costos externos o externalidades atmosféricas durante la operación de las Centrales Termoeléctricas (CTE) en el país. Como metodología general se utiliza la metodología «Vías de impacto». Las actualizaciones fueron hechas en cada una de sus etapas. Para obtener el inventario de contaminantes emitidos se emplearon Factores de Emisión obtenidos de mediciones in situ que actualmente están siendo incorporado en diferentes estudios. Utilizando la herramienta SIMPACTS se realizaron las modelaciones de transporte de la contaminación atmosférica. El SIMPACTS en su versión actual es superior a sus versiones anteriores por tratar el transporte de contaminantes con el sistema de modelos CALMET-CALPUFF-CALPOST, que es actualmente el modelo regulatorio de la EPA para evaluar la dispersión de contaminantes en zonas de meteorología compleja y entre 50-300 km de la fuente de emisión [Fonseca, *et al.*, 2010]. Este sistema de modelos se ajusta perfectamente al dominio de modelación local y regional.

Se realizó además una búsqueda y actualización de valores de Funciones Exposición-Respuesta para ello se utilizaron los estudios internacionales disponibles y más recientes [EPA, 2017; Zanobetti, *et al.*, 2009; Peng, *et al.*, 2009; Fung, *et al.* 2006; Ito, *et al.*, 2007].

Por otra parte se estimaron y(o) actualizaron nuevos costos en salud para los efectos seleccionados a partir de estudios más recientes, entre ellos EPA, 2017. Los resultados obtenidos para el año 2015 muestran valores de externalidades entre 0,02-0,64 centavos CUC/kWh.

Palabras clave: externalidades, costos externos, contaminación atmosférica.

Updating of methodologies for evaluation of atmospheric externalities related with Cuban thermoelectric plants

Abstract

The present work is an update in the methodologies of estimation of the external costs or atmospheric externalities during the operation of the Thermoelectric Power Plants (TPP) in the country. As a general methodology «Impact Pathways methodology» was used. The updates were made in each of its stages. To obtain the pollutants emitted inventory, Emission Factors obtained from in situ measurements that are currently being incorporated in different studies of were used. Using the SIMPACTS tool was carried out the modeling transport of atmospheric pollution. The SIMPACTS current version is better to its previous versions in the step of pollutants transport, because was used the system models CALMET-CALPUFF-CALPOST, which is currently the regulatory model of the EPA to assess the dispersion of pollutants in complex meteorological areas and between 50-300 km from the emission source [Fonseca, *et al.*, 2010]. This model perfectly fits modeling for the local and regional domain.

In addition, a search and update of Exposure-Response Function values was carried out. The most recent and available international studies were used [EPA, 2017; Zanobetti, *et al.*, 2009; Peng, *et al.*, 2009; Fung, *et al.* 2006; Ito, *et al.*, 2007].

On the other hand, new health costs were estimated and / or updated for the effects selected from more recent studies, including EPA, 2017. The results obtained for the year 2015 show values of externalities between 0.02-0.64 cents CUC / kWh.

Key words: saving, energy, renewable, solar, food.

Introducción

El uso de la energía en todas sus formas proporciona grandes beneficios; sin embargo, también está asociado a numerosos desafíos medioambientales y sociales. La generación de electricidad a partir de combustibles fósiles produce diferentes impactos negativos. Los más significativos son a nivel local la contaminación atmosférica, a nivel regional, la lluvia o deposición ácida, y a nivel global el cambio climático.

Cuando estos impactos son provocados por la generación de electricidad, son considerados Costos Externos o Externalidades cuando no son incluidos en los precios del mercado de la energía, y por tanto distorsionan la valoración económica. Las sociedades modernas se encuentran ante el reto de poder «internalizar» los costos asociados a esos impactos; sin embargo, aunque no lleguen a ser propiamente internalizados, el simple hecho de conocerlos ayuda a crear condiciones más favorables para trazar políticas y estrategias con vistas a reducir las emisiones generadas por este sector, entre ellas la introducción de tecnologías de reducción o control de emisiones, el empleo de combustibles más eficientes y/o menos contaminantes, etc.

Las externalidades estimadas son útiles para la toma de decisiones en el sector energía y pueden ser usadas en:

- Estudios de mitigación,
- Valoración integral de tecnologías y procesos,
- Seleccionar la ubicación de nuevas instalaciones,
- Estimar costos efectivos de esquemas de mitigación ambiental y de la factibilidad de instalar tecnologías para la reducción de emisiones,
- Análisis comparativos de opciones y estrategias de desarrollo,
- Promoción de fuentes de energía renovables,
- Planificación energética, y
- Tomar decisiones ejecutivas.

Los resultados de ExternE [European Commission, 2005] demostraron que las menores externalidades por su bajo impacto en la contaminación atmosférica corresponden

a las tecnologías renovables, mientras que en las fósiles fueron superiores.

Por otra parte, el proyecto CASES (Cost Assessment for Sustainable Energy Systems) [European Commission, 2008], que tuvo como objetivo obtener una evaluación completa y coherente de los costos totales de las fuentes energéticas que incluían los costos externos y los privados, obtuvo como resultado que los menores costos totales correspondían a los ciclos combinados de gas, la hidroenergía, la biomasa y la energía eólica on-shore.

Los costos actuales de generación eléctrica en Cuba [Cubadebate, 2014] están en el orden de los 21,1 centavos USD/ kWh y 6,5 centavos CUC/ kWh entregado, superiores a los que la bibliográfica reporta para las tecnologías fósiles más comunes. Las estrategias hasta 2030 están encaminadas a reducir estos costos en alrededor de 15 % y cambiar la matriz energética actual, aumentando la participación de las fuentes renovables desde 4,6 % a 24 %.

Teniendo en cuenta los elevados costos de generación y sin considerar los costos ambientales, es posible evaluar diversas tecnologías para su introducción en la matriz energética del país. Sin embargo, es importante evaluar los costos ambientales de cada tecnología, pues no existe ninguna absolutamente limpia.

En este artículo se presentan las metodologías y resultados obtenidos de los costos externos o externalidades de la generación por Centrales Termoeléctricas (CTEs) en el país durante el año 2015, por el empleo de combustibles fósiles (mayormente crudo nacional). Los resultados para la generación termoeléctrica están entre de 0,04-1,03 cent. CUC/kWh. Las metodologías empleadas, aunque en su esencia siguen una metodología general, en cada una de sus etapas se han realizado modificaciones ya sea por la actualización de los datos empleados, o por la utilización de modelos al nivel actual del estado del arte no incorporados en estudios previos.

Materiales y métodos

Para evaluar las externalidades de la generación termoeléctrica se aplica la metodología Vías de Impacto, la cual cuenta con cuatro etapas fundamentales, ver figura 1.



Fig. 1. Metodología Vías de Impacto. Contaminación atmosférica local y regional. Fuente: Elaboración propia con base en European Commission, ExternE, 2005.

1. Metodología para estimar el inventario de contaminantes emitidos

La primera etapa de esta metodología [Meneses, *et al.*, 2015] es la caracterización de la fuente emisora que incluye la localización de la fuente, los datos de la chimenea y los flujos de contaminantes emitidos, entre otros.

Para estimar las emisiones se empleó el método de factores de emisión (FE), esta vez utilizando factores propios obtenidos a partir de mediciones directas de gases en las centrales termoeléctricas cubanas [Meneses, *et al.*, 2015], y los valores que se toman para el estudio se muestran en la tabla 1. Estos valores incluyen el rango de incertidumbre asociado.

Tabla 1. FE en gramos de contaminante por kg de combustible consumido en calderas de vapor y motores con intervalo de confianza

Tecnología	Factor de emisión (g/kg)			
	CO	CO ₂	NO _x	SO ₂
Crudo (Calderas CTE)	25,2 ± 7,3	2892,6 ± 71,5	4,8 ± 1,3	128, ± 4,9
Fuel Oil (Calderas CTE)	5,2 ± 3,7	3172,9 ± 12,7	4,4 ± 0,2	39,1 ± 0,5

Cada CTE constituye una fuente de emisión. La tabla 2 muestra los datos de localización, altura y diámetros de las chimeneas; así como la temperatura de salida de los gases. Ante la escasez de datos de mediciones de partículas en CTE, no ha sido posible estimar factores de emisión propios para este contaminante, por lo que se estimaron a partir de los factores de emisión de PM₁₀ filtrables, propuestos por la EPA para emisiones incontroladas en calderas de CTE quemando fuel oil residual tipo 6 en la AP-42, Sección 1.3 – (Fuel Oil Combustion, Final Section, Supplement E) [EPA, 2010].

Tabla 2. Datos de la fuente

CTE/ No Unidades	Latitud	Longitud	Altura chimenea	Diámetro de la chimenea	Temperatura	
						°
CTE Máximo Gómez						
1. Unidades de 100 MW	4		65	6	160,06	
CTE Antonio Guiteras						
2. 330	1	23,06	81,55	150	10,2	150,00
CTE C, M, Céspedes						
3. 158	2	22,16	80,45	100	6	119,88
CTE 10 de Octubre						
4. Unidades de 125 MW	3	21,57	77,27	180	6,50	153,75
CTE Antonio Maceo						
5. Unidad 3, 100 MW	1		120	5		161,29
6. Unidades 5 y 6, 100 MW	2		120	4,8		148,04
CTE Felton						
7. 250	2	20,72	75,59	150	7	157,64

CTE/ No Unidades	Latitud	Longitud	Altura chimenea	Diámetro de la chimenea	Temperatura	
						°
CTE Este de La Habana						
8. 100	3	23,16	81,95	180	6	170,00
CTE Otto Parellada						
9. 64	1	23,12	82,35	45,70	4,56	170,18

La generación y el consumo de combustible por unidad se obtuvieron de los registros de la Unión Eléctrica (UNE) para el año 2015. Por lo general una misma unidad usó diferentes tipos combustibles, ya sea por diferentes tipos de crudo (1400, 1100 o 650) o de fuel oil; se calculó una composición ponderada en base al consumo. El contenido de azufre usado para cada CTE aparece en la tabla 3.

Tabla 3. Contenido de S ponderado para cada CTE

Tecnología	Factor de emisión (g/kg)
CTE Máximo Gómez	6,90
CTE Antonio Guiteras	6,90
CTE Carlos Manuel de Céspedes	2,12
CTE 10 de Octubre	6,9
CTE Antonio Maceo	2,12
CTE Lidio Ramón Pérez	7,13
CTE Este Habana	7,13
CTE Otto Parellada	2,12

Las emisiones obtenidas para cada una de las centrales, así como las velocidades de salida de los gases, se muestran en la tabla 4:

Tabla 4. Emisiones en toneladas al año y velocidad de salida de los gases

CTE	SO ₂	NO _x	PM ₁₀	Velocidad
	ton/año	ton/año	ton/año	m/s
CTE Máximo Gómez	42 734,3	2283,7	2377,9	21,3
CTE Antonio Guiteras	53 985,1	2885,0	3004,0	9,5
CTE Carlos Manuel de Céspedes	16 426,8	1808,7	1016,9	6,2
CTE 10 de Octubre	60 322,4	3223,7	3356,6	10,3
CTE Antonio Maceo	9752,4	1073,8	603,7	10,4
CTE Lidio Ramón Pérez	92 220,2	4928,3	5131,5	14,6
CTE Este Habana	40 976,8	2189,8	2280,1	26,2
CTE Otto Parellada	2102,0	231,4	130,1	6,0

2. Modelación de la dispersión de contaminantes

La dispersión de contaminantes atmosféricos y consecuentemente las evaluaciones de sus afectaciones a la calidad de aire, constituye la segunda etapa de la Metodología Vías de Impacto. Para el transporte de los contaminantes se propone el uso del modelo CALPUFF, regulatorio de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA,

por sus siglas en inglés y utilizado en Cuba con anterioridad para varios estudios).

El Sistema CALMET-CALPUFF [Scire, *et al.*, 2000] fue desarrollado por EarthTech (Concord, MA) y es el modelo propuesto a partir del 2003 por la EPA como modelo de uso regulatorio para realizar la modelación detallada de los procesos de dispersión de contaminantes atmosféricos, en dominios regionales (a distancias de la fuente entre 50 y 200 km con valores aceptables hasta 300 km), y en dominios locales (entre 0 y 50 km de distancia de la fuente) en situaciones de vientos complejos (topografía compleja, cambios en el uso de suelo, cañones urbanos), pues usa campos de vientos tridimensionales.

CALPUFF es un modelo de dispersión de tipo *puff*, gaussiano, de varias capas, de varias especies no estacionario, que simula los efectos del tiempo, el espacio y la variación de las condiciones meteorológicas en el transporte de contaminantes, su transformación y remoción [Fonseca, *et al.*, 2010].

Para este tipo de modelaciones y como paso de avance a los estudios previos donde se utilizaba solo un modelo local (ISCST3) [EPA, 1995] y una ecuación simplificada para evaluar la dispersión a escala regional [Spadaro, 2002], se propone el uso de CALPUFF para las CTE cubanas por estar todas ubicadas en zonas de vientos complejos (costas) y tener chimeneas altas que transporten los contaminantes más allá de los 50 km que es el máximo de confiabilidad en los modelos de alcance local.

Como resultado de esta etapa se brindan los incrementos de concentraciones en cada rejilla establecida para cada contaminante en cada una de las fuentes.

3. Evaluación de impacto en salud y costos

La tabla 5 muestra un resumen de los valores propuestos para la evaluación de los impactos y costos basados en las metodologías empleadas por Meneses E. *et al.* (2008a,b) y actualizados con datos de 2015. La mortalidad, a diferencia de la morbilidad se expresa en Años de Vida Perdidos (AVP).

4. Modelo SIMPACTS

El modelo SIMPACTS es la herramienta propuesta por el Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA) para evaluar los costos externos de proyectos hídricos, nucleares

y de combustibles fósiles. No es una herramienta flexible pues su objetivo es utilizar los resultados para que sean incorporados a los modelos de planificación energética. Tampoco es recomendable para estudios precisos de calidad de aire donde es necesario comparar con las normas existentes, ni permite la incorporación de nuevas fuentes renovables de energía (FRE), entre otras. Sin embargo, constituye una herramienta útil para evaluar el transporte de contaminantes atmosféricos al tener incorporado el sistema de modelos de CALMET-CALPUFF-CALPOST, sin necesidad de que sea acoplado con el modelo de pronóstico meteorológico WRF [Capote Gil, *et al.*, 2011] pues se nutre de una base meteorológica tridimensional que sustituye los datos alimentados por este modelo; esto disminuye los tiempos de corridas de los modelos, casi imposible con las capacidades actuales de cálculo.

La opción de sustituir los datos meteorológicos tridimensionales suministrados por el modelo WRF, por los obtenidos del European Centre for Medium Range Weather Forecasts model (ECMWF), constituye la simplificación más importante de esta metodología. Al igual que otros modelos de dispersión con alto grado de complejidad y detalle, utiliza los datos de elevación de terreno y uso del suelo.

Las figuras siguientes (Figs. 2-7) muestran en forma gráfica los resultados obtenidos, tanto de características del terreno como meteorológicos para la CTE Otto Parellada en el dominio de modelación (200 km x 200 km), donde está incluida la ciudad de La Habana. Estos datos constituyen las salidas del modelo CALMET.

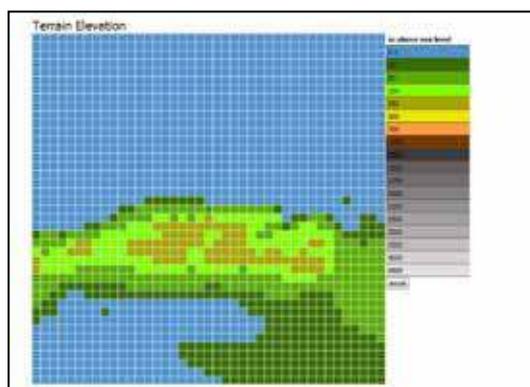


Fig. 2. Representación de la elevación el terreno.

Tabla 5. Pendientes de las Funciones Exposición-Respuesta, SFER, expresadas en (casos o AVP/(persona-año- $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y costos unitarios por efectos en salud expresados en CUC

Efecto	SFER para PM10	SFER para SO ₂	SFER para NO ₂	SFER para sulfatos	SFER para nitratos	Costo por caso en CUC
Bronquitis crónica	1,97E-05			3,28E-05	1,97E-05	121847
Infarto agudo de miocardio, no fatal	3,14E-06			5,24E-06	3,14E-06	51 576
Admisiones hospitalarias, respiratorias	1,76E-05	3,64E-05	4,58E-05	2,94E-05	1,76E-05	8707
Admisiones hospitalarias, cardiovasculares	5,88E-07			9,80E-07	5,88E-07	8803
Visitas a salas de urgencia (asma)	2,53E-05	3,29E-05	4,11E-05	4,21E-05	2,53E-05	116
Bronquitis aguda niños	8,42E-05			1,40E-04	8,42E-05	95
Días laborales perdidos	5,94E-02			9,91E-02	5,94E-02	30
Síntomas respiratorios	1,64E-06			2,74E-06	1,64E-06	68
Mortalidad aguda		1,41E-06	2,54E-06			31 711
Mortalidad crónica	1,92E-04			3,20E-04	1,92E-04	18 310

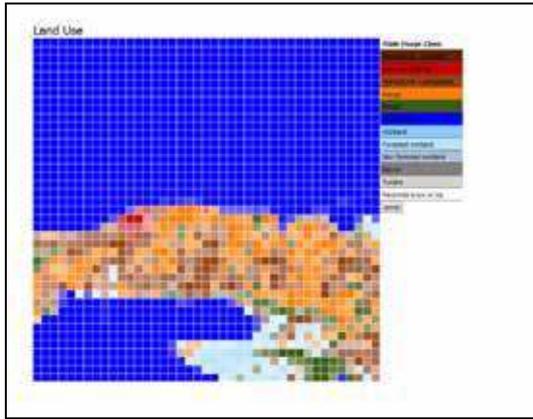


Fig. 3. Representación del uso de suelo.

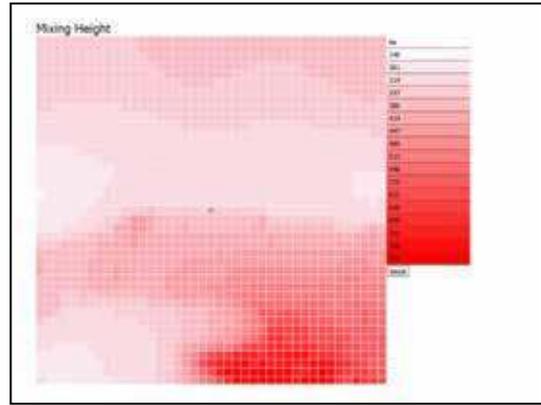


Fig. 7. Representación de la altura de la capa de mezcla.

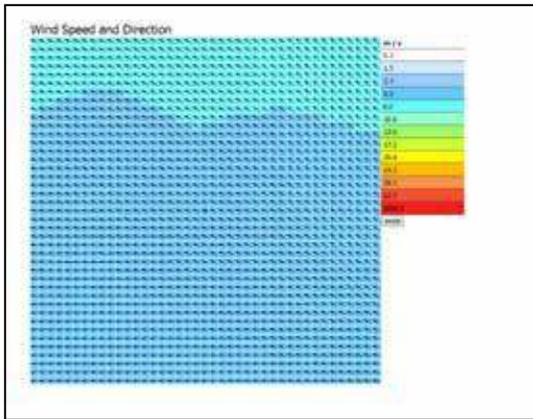


Fig. 4. Representación de la velocidad y dirección del viento.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la modelación de la contaminación para el mismo caso de estudio (Figs. 8-12). Cada figura representa los incrementos de las concentraciones ambientales del contaminante en las diferentes rejillas del dominio.

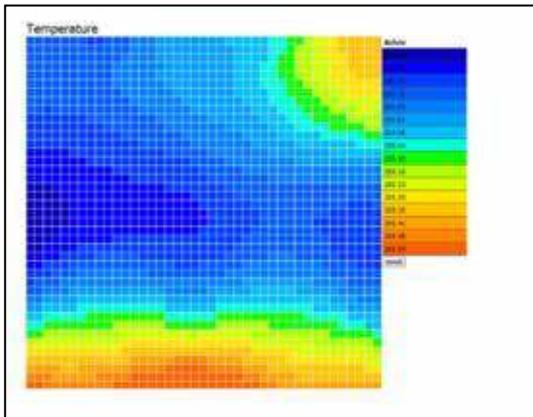


Fig. 5. Representación de la temperatura.

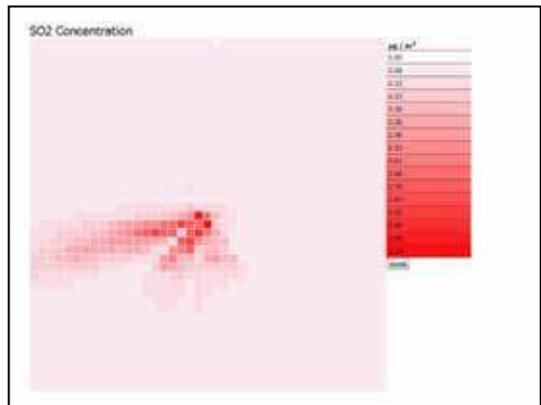


Fig. 8. Representación de las concentraciones de SO₂.

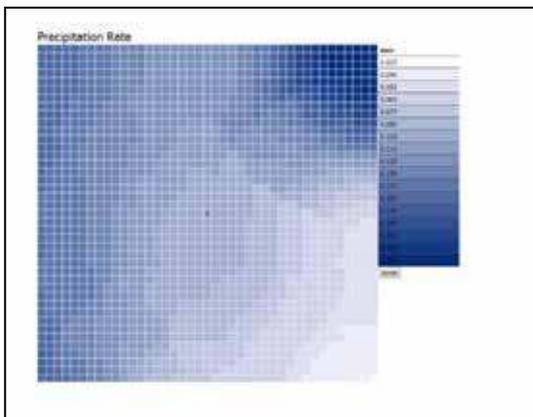


Fig. 6. Representación de la tasa de precipitación.

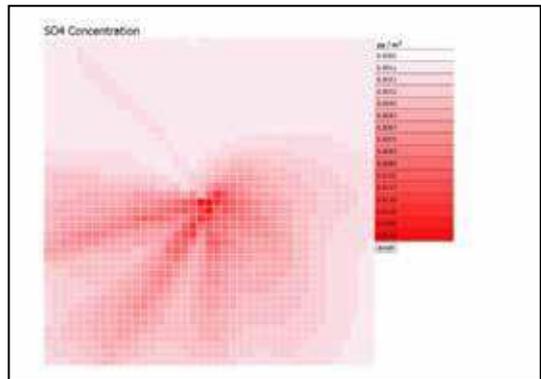


Fig. 9. Representación de las concentraciones de sulfatos.

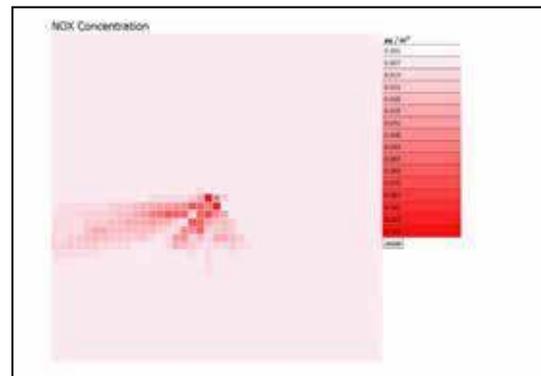


Fig. 10. Representación de las concentraciones de NO_x.

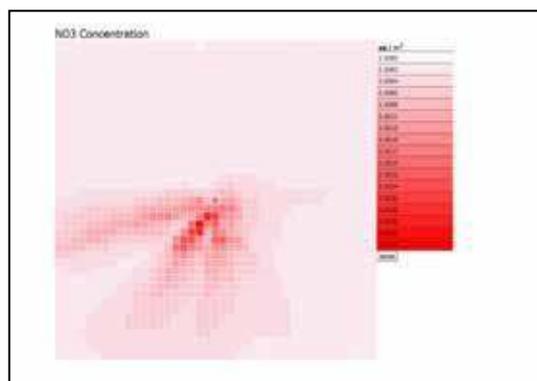


Fig. 11. Representación de las concentraciones de nitratos.

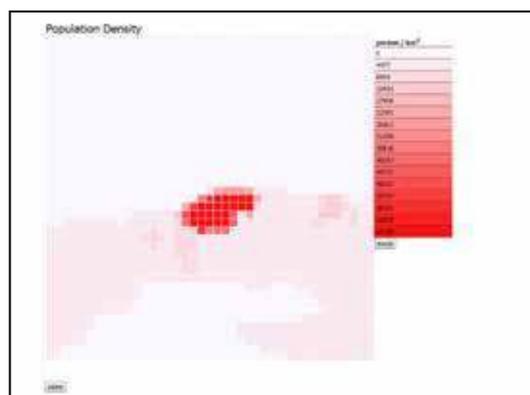


Fig. 13. Representación de la distribución de población en el dominio de la CTE Otto Parellada.

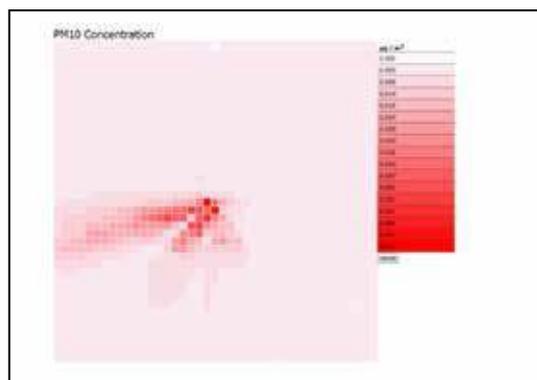


Fig. 12. Representación de las concentraciones de PM₁₀.

5. Datos de población

Para obtener los datos de población en la forma que se necesitan, independientemente de los métodos que se utilicen para las evaluaciones de impacto, se precisa del uso de Sistemas de Información Geográfica. Para este trabajo se utilizó el sistema MapInfo V.9. Se enlazaron los datos de población por municipios según la división política administrativa de Cuba y las rejillas correspondientes a cada CTE. Se utilizaron los datos del 2015, obtenidos de las estadísticas nacionales [ONEI, 2016], (Fig. 13).

6. Costos externos obtenidos para las CTE

Después de aplicar la metodología Vías de Impacto se llegó a los resultados siguientes: el monto total de los costos del daño para todas las CTE resultó de 38,24 millones de CUC, correspondiendo los valores más elevado a la CTE

Antonio Guiteras, donde los costos se aproximaron a 24 % por encima de los costos totales para todos los casos evaluados (Ver Tabla 6).

De forma general los mayores costos se le atribuyen a los sulfatos, resultando sus aportes cerca de 60 % de los costos totales por planta, exceptuando la CTE Otto Parellada donde el aporte de las partículas tiene el primer lugar por importancia; cabe señalar que esta Central se encuentra ubicada en el centro de la ciudad de La Habana donde la densidad local de la población es elevada y por tanto aumenta el aporte de los contaminantes primarios como las PM₁₀ y los SO₂. Para el resto de las plantas continuaron en orden de importancia los aportes de las partículas nitratos, SO₂ y NO_x.

Al estimar solo los costos externos por el impacto en la salud humana, no estamos reflejando los costos externos reales que se obtienen en cada una de las plantas evaluadas, ya que faltan por incluir los impactos en otros receptores como son materiales, cultivos, ecosistemas, calentamiento global, etc. Sin embargo, es en la salud humana donde se han detectado existen los mayores impactos, representando más de 75 % de los costos totales de acuerdo a los resultados del proyecto CASES.

Al evaluar los resultados en CUC por tonelada de contaminante emitida, los mayores valores de impacto le corresponden a las partículas, seguidas por los SO₂, y NO_x como se observa en la Tabla 7. Las CTE Otto Parellada presentó los costos más elevados para todos los contaminantes debido a su ubicación.

Tabla 6. Costos totales del daño en MM CUC por planta y tipo de contaminante

Efecto	PM10	SO ₂	NO _x	Sulfatos	Nitratos	Costos Totales
CTE Máximo Gómez	0,51	0,41	0,006	2,37	0,03	3,33
CTE Antonio Guiteras	0,98	0,89	0,008	2,52	0,04	4,43
CTE C. M. Céspedes	0,11	0,08	0,006	0,21	0,01	0,42
CTE 10 de Octubre	0,54	0,52	0,012	1,17	0,02	2,27
CTE Antonio Maceo	0,04	0,04	0,002	0,10	0,00	0,18
CTE Lidio R. Pérez	0,97	0,99	0,029	2,79	0,05	4,83
CTE Este-Habana	1,29	1,26	0,026	2,17	0,04	4,79
CTE Otto Parellada	0,35	0,32	0,031	0,29	0,02	1,01

Tabla 7. CUC/tonelada de contaminante emitida

CTE	PM ₁₀	SO ₂	NO _x
CTE Máximo Gómez	215,6	64,9	16,6
CTE Antonio Guiteras	325,4	63,2	15,8
CTE C. M. Céspedes	105,9	18,2	7,1
CTE 10 de Octubre	159,4	28,2	9,9
CTE Antonio Maceo	71,8	13,8	3,9
CTE Lidio R. Pérez	189,5	41,0	15,4
CTE Este-Habana	564,5	83,8	31,2
CTE Otto Parellada	2699,9	290,7	227,4

A partir de los costos totales se calcularon los costos específicos en centavos de dólar por kWh generado en las plantas. Los valores estimados de estos costos oscilaron entre 0,02-0,64 cent./kWh (Ver Tabla 8), correspondiendo los valores más elevados a las Centrales Otto Parellada, Este-Habana, y Máximo Gómez, plantas ubicadas cerca o dentro de la Ciudad de La Habana. Es bueno señalar que estos costos además de depender de los costos totales del daño dependen del nivel de generación de las plantas, pues existen plantas como la CTE Lidio R. Pérez con elevados costos totales del daño sin embargo al tener un alto nivel de generación sus costos específicos no son tan elevados.

Tabla 8. Centavos CUC por kWh generado

CTE	Cent.CUC/kWh
CTE Máximo Gómez	0,27
CTE Antonio Guiteras	0,23
CTE C. M. Céspedes	0,02
CTE 10 de Octubre	0,12
CTE Antonio Maceo	0,02
CTE Lidio R. Pérez	0,17
CTE Este-Habana	0,37
CTE Otto Parellada	0,64

Los impactos por mortalidad representaron 47 % de los costos totales del daño reservando el resto para la morbilidad. La bronquitis crónica y las admisiones hospitalarias respiratorias, representaron 30 y 20% de los costos totales del daño.

Conclusiones

A partir de actualizar las metodologías de evaluación de externalidades se obtuvieron los valores de costos del daño para las CTEs del país. El estudio estimó para el año 2015, costos totales de 21,26 millones de CUC anuales, correspondiendo los valores más elevados a las CTEs Lidio R. Pérez, Este-Habana y Antonio Guiteras, donde los costos se aproximaron a 22,7, 22,5 y 20,9 % de los costos totales del daño respectivamente.

De forma general los mayores costos se le atribuyen a los sulfatos resultando sus aportes cerca de 54,7 % de los costos totales por planta. Para la CTE Otto Parellada el aporte de las partículas tiene el primer lugar por importancia, debido a que esta Central se encuentra ubicada en el centro de la ciudad de La Habana donde la densidad local de población es elevada y por tanto aumenta el aporte de los contaminantes primarios como las PM₁₀ y los SO₂. Para el resto de las

plantas continuaron en orden de importancia los aportes de las partículas, SO₂, nitratos y NO_x.

Al evaluar los resultados en CUC/tonelada de contaminante emitida, los mayores valores de impacto le corresponden a las partículas, seguidas por los SO₂, y NO_x en todas las centrales. Los costos en centavos de CUC por kWh oscilaron entre 0,02-0,64 correspondiendo los valores más elevados a las Centrales Otto Parellada, Este-Habana, y Máximo Gómez.

Los impactos por mortalidad representaron 47 % de los costos totales del daño reservando el resto para la morbilidad. La bronquitis crónica y las admisiones hospitalarias respiratorias, representaron 30 y 20 % de los costos totales del daño.

Referencias

- CAPOTE G., L. TURTÓS, L. ÁLVAREZ, A. BEZANILLA, I. BORRAJERO (2011) «Implementación del WRF en Cuba para su uso en modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos, Memorias del VI Congreso Cubano de Meteorología, 29 Nov-2 Dic 2011». ISBN: 978-959-7167-29-7.
- CUBADEBATE (2014). «Mesa Redonda del 12 de agosto de 2014».
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1995). «User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models». Vol. II-Description of Model Algorithms EPA-454/B-95-003b. US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park.
- EUROPEAN COMMISSION, EXTERNE (2005). «Externalities of Energy: Methodology 2005 Update, (EUR 21951)», Directorate-General XII, Science Research and Development, Office for Official Publications of the European Communities, L-2920, Luxembourg, F75272, Paris, Cedex 06, France.
- EUROPEAN COMMISSION (2008). Project No 518294 SES6, CASES - Cost Assessment of Sustainable Energy Systems, WP6 - DELIVERABLE D.6.1. «Full cost estimates of the use of different energy sources». Last update: September 2008.
- FONSECA Y. (2010). «Implementación y aplicación del sistema de modelación CALMET-CALPUFF-CALPOST a escala local». Trabajo de Diploma, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (INSTEC), Departamento de Ingeniería Nuclear.
- MENESES E., ET AL. (2015). «Salida: Metodología establecida para evaluar las externalidades ambientales, desde la perspectiva de análisis de ciclo de vida de tecnologías energéticas, fósiles y renovables. Programa: Desarrollo Sostenible de las Fuentes Renovables de Energía». La Habana, marzo 2015.
- MENESES E., ET AL. (2008a). «Programa Nacional Desarrollo Energético Sostenible. Externalidades del transporte. Propuesta de funciones exposición-respuesta a emplear en los estudios de externalidades del transporte». La Habana, marzo 2008.
- MENESES E., ET AL. (2008b). «Programa Nacional Desarrollo Energético Sostenible. Externalidades del transporte. Valoración de los costos en salud para los efectos seleccionados». La Habana, septiembre 2008.
- MENESES E., ET AL. (2017). «Estimación de factores de emisiones a partir de mediciones de gases en instalaciones generadoras de electricidad». Aceptado para publicar Revista Cubana de Meteorología.
- SCIRE, J.S., STRIMAITIS, D.G., YAMARTINO, R.J. (2000). «A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model (Version 5.0). Earth Tech, Inc., Concord, MA».
- SPADARO J. (2002). «AirPacts Manual (versión 1.0). A tool for assessing the environmental impacts and damage costs to human health, agricultural crops and man-made structures from exposure to routine atmospheric emissions. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, Austria. October 2002.

WWW.ONEI.CU

Muestreo pasivo de contaminantes atmosféricos. Perspectiva de uso en Cuba

Por Ing. Janet Canciano-Fernandez*, M. Sc. Mirtha Reinos-Valladares*, Ing. Yan Carlos Ordoñez-Sánchez*, Dariela Valdés Placencia* y Dr. Anel Hernández-Garces**

*Centro de Ingeniería e Investigaciones Químicas (CIIQ). Vía Blanca s/n entre Infanta y Palatino, Cerro, La Habana, Cuba.

**Centro de Estudios de Ingeniería de Procesos (CIPRO), Departamento de Contaminación Atmosférica, Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae).

E-mail: janet@inor.ciiq.minem.cu; janet@ciiq.minem.cu;
mirtha@ciiq.minem.cu; yancarlos@ciiq.minem.cu;
dariela@ciiq.minem.cu; anel@quimica.cujae.edu.cu

Resumen

En este trabajo se realizó un análisis a partir de una revisión bibliográfica profunda sobre el estado actual del uso de muestreadores pasivos en la medición de la calidad del aire en Cuba, específicamente del tipo Radiello. Se recopiló documentación actualizada acerca de los procedimientos utilizados internacionalmente, el desarrollo que ha tenido desde sus inicios de implementación hasta la actualidad y la aplicación que se les ha dado para el estudio, determinación, evaluación, modelación y simulación de los diferentes contaminantes atmosféricos, lo cual contribuye a la toma de decisiones en la política ambiental de la Nación. Como resultado se obtuvo que el muestreo pasivo tradicional es ampliamente utilizado, aunque se muestra la superioridad del captador pasivo Radiello debido a su simetría radial, bajo costo de operación y sencillez de los métodos analíticos involucrados.

Palabras clave: calidad del aire, captadores pasivos, contaminación atmosférica, Radiello.

Passive sampling of atmospheric contaminants. Perspective of use in Cuba

Abstract

In this paper an analysis was conducted from a literature review on the current status of passive samplers use for measuring air quality in Cuba, specifically the type Radiello. Updated documentation was collected on the procedures used internationally, the development from its beginning to the present and the application that have been given to them for the study, determination, evaluation, modeling and simulation of the different atmospheric contaminants, which contributes to decision in nation's environmental policy. As a result it was obtained that traditional passive sampling is widely used, although the superiority of the Radiello passive pickup is shown because of its radial symmetry, low operating cost and simplicity of the analytical methods involved.

Key words: air pollution, air quality, passive samplers, Radiello.

Introducción

El reconocimiento de que la civilización a nivel mundial puede cambiar el ambiente es un concepto relativamente nuevo [UNEP, 1998; Botkin y Keller, 2000]. El desarrollo del hombre y la industrialización de la sociedad

trajeron consigo la generación de una gran cantidad de sustancias que modifican la composición natural del aire, entre los que destacan los óxidos de nitrógeno y de azufre, dióxido de carbono, monóxido de carbono y ozono, llamados contaminantes primarios [Andrés, Ferrero, Mackler, 2000].

La quema de combustibles fósiles para el transporte y la generación de energía, tanto a nivel industrial como doméstico, produce miles de toneladas de contaminantes que diariamente son emitidos a la atmósfera. El deterioro de la calidad del aire por la presencia de estas sustancias tiene un efecto negativo en la salud humana y el medioambiente.

Es preciso señalar que si bien el término contaminación suele emplearse para referirse a la ocasionada por fuentes antrópicas (originada en actividades humanas), también existe contaminación natural originada en erupciones volcánicas, incendios forestales, descomposición de materiales, entre otras fuentes [Godish, 1991; Botkin y Keller, 2000; Barrenetxea *et al.*, 2003].

La contaminación del aire significa un importante daño medioambiental para la salud, tanto en países desarrollados o en desarrollo. Una evaluación de 2013 realizada por la Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer, de la OMS, determinó que la contaminación del aire es carcinógena para el ser humano, y que las partículas del aire contaminado están estrechamente relacionadas con la creciente incidencia del cáncer, especialmente el de pulmón. También se ha observado una relación entre la contaminación del aire y el aumento del cáncer de vías urinarias y vejiga [OMS, 2016].

Los óxidos de azufre causan generalmente problemas en la zona superior del sistema respiratorio, tales como constricciones bronquiales e irritación en los ojos y garganta. El mayor perjuicio lo causan cuando junto con la humedad y material particulado existente en el aire, forman nieblas de ácido sulfúrico y sulfuroso [Andrés, Ferrero y Mackler, 2000].

Los óxidos de nitrógeno producen trastornos respiratorios en las personas sensibles, como asmáticos y niños de corta edad. Según estudio realizado por la Organización Mundial de la Salud, el riesgo de las enfermedades respiratorias en niños aumenta 20 % cuando se exponen durante varias semanas a un incremento de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sobre las condiciones normales [Bower y Broughton, 1991].

Los materiales particulados producen daños al tracto respiratorio y potencian los efectos de los otros contaminantes gaseosos [Andrés, Ferrero y Mackler, 2000].

Es por ello que desde hace algún tiempo se ha desarrollado una gran variedad de métodos analíticos para determinar las concentraciones de contaminantes en el aire, en dependencia del contaminante en específico a medir [Pire, 2002]. Existen varias metodologías de medición de la calidad del aire, entre las que destacan el muestreo activo, monitoreo automático y muestreo pasivo.

Este trabajo tiene como objetivo analizar el estado actual del empleo de captadores pasivos en la medición de los principales contaminantes atmosféricos, evolución histórica y perspectiva de desarrollo en Cuba.

Análisis y discusión

1. Generalidades de los captadores pasivos

Los primeros muestreadores difusivos fueron descritos como dispositivos cualitativos [Brown, 2000]. En 1946, los resúmenes del «Primer Simposio Internacional sobre Muestreo Difusivo» que tuvo lugar en Luxemburgo, definían a los captadores pasivos como «Un difusor pasivo

es un dispositivo capaz de captar muestras de contaminantes de gas o de vapor de la atmósfera, con una velocidad controlada por un proceso físico como la difusión a través de una capa de aire estático, o de permeación a través de una membrana, sin la intervención de un movimiento activo de aire a través del captador» [Cano, 2009].

Los primeros sistemas pasivos fueron desarrollados por Palmes, Gunnison, Di Mattio y Tomczyk [1976], cuyo diseño consistió en un tubo cilíndrico cerrado en uno de sus extremos, donde se colocaba un cedazo impregnado con una disolución capaz de retener a la especie química cuya concentración se deseaba conocer. Aunque hoy en día existen otros diseños, dicho sistema sigue en uso [Vardoulakis *et al.*, 2009].

El captador pasivo ha ganado un espacio importante en la medición de la calidad del aire, convirtiéndose en una alternativa adecuada para estudios ambientales de largo alcance y largo plazo, así como para análisis previos y de diseño de redes de monitoreo ambiental. Pueden ser usados en investigaciones de línea base para la determinación de la concentración de los principales gases contaminantes del aire. La exposición por períodos prolongados brinda un promedio representativo de la zona en estudio, en planes de monitoreo de calidad del aire en actividades que no generen episodios o picos de contaminación agudos (de pocas horas) y/o necesitan los resultados en tiempo real, sino que sean fuentes de emisión relativamente continua, como complemento a las mediciones continuas, de manera que se pueda reducir el número de estaciones automáticas y se logre evaluar una mayor área. En campañas de monitoreo para determinar la concentración a la que una población se encuentra expuesta a largo plazo, se emplea como herramienta para realizar un mapeo de la contaminación, evaluar la distribución espacial de las concentraciones y calibrar y validar los modelos de dispersión [Parada, 2011].

Entre las ventajas más importantes se destaca su simplicidad, facilidad de ubicación debido al reducido tamaño, bajo costo de operación [Namiesnik, Zabiegała, Kot-Wasik, Partyka y Wasik, 2005] y sencillez de los métodos analíticos involucrados (Cape, 2009). No es necesario el movimiento activo de aire, por lo que no se precisa comprar, mantener o calibrar una bomba de aire. Son menos susceptibles al daño y al robo, y son buenos indicadores de la concentración promedio de contaminación en periodos de semanas a meses [Brown, 2000].

Como desventaja, no están desarrollados para todos los contaminantes y solo proporcionan valores promedios con resoluciones típicas semanales o mensuales; tampoco tienen gran exactitud y sirven solo como valor referencial.

El laboratorio de Física de la Atmósfera de la Universidad de Cocody, Costa de Marfil, en conjunto con el Laboratorio de Aerología de la Universidad de Toulouse, Francia, y otras instituciones, realizaron una investigación con el fin de conocer y caracterizar el ambiente de siete sitios remotos y representativos de los diversos ecosistemas presentes en África Occidental y Central (sábanas secas, sábanas húmedas y bosques), mediante mediciones a largo plazo de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, amoníaco y ácido nítrico, utilizando captadores pasivos en el período de 1998 a 2007. Los captadores pasivos empleados en dicho trabajo fueron

desarrollados por el Laboratorio de Aerología de Toulouse [Adon, 2010].

La universidad Tribhuvan, Nepal, realizó estudios de medición de dióxido de nitrógeno en el ambiente en la ciudad de Kathmandú, empleando captadores pasivos en varios puntos de muestreo, dividido en dos campañas: período lluvioso durante los meses de julio-octubre de 2007 y en el período seco de febrero a abril de 2008. Se determinaron en el laboratorio siguiendo el método modificado de Griess-Saltzman, obteniéndose buenos resultados en la caracterización del ambiente y en la aplicación de este tipo de muestreo [Maskey, 2012].

En Emiratos Árabes Unidos también se realizaron investigaciones de determinación de dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre, ozono y amoníaco en el aire ambiente durante un año, empleando el método de muestreo pasivo asociado con análisis por cromatografía de intercambio iónico y potenciométricos. Fueron monitoreados cinco puntos de muestreo que representaban la zona industrial, el tráfico, área comercial, residencial y de fondo de la ciudad. Los muestreadores pasivos en este trabajo se mostraron no solo precisos, sino también de bajo costo, baja demanda técnica y convenientes para monitorear diferentes puntos [Salem, 2009].

La Universidad Nacional de Colombia, en convenio con el área metropolitana del Valle de Aburrá realizó estudios para fortalecer el monitoreo de la calidad del aire en dicha ciudad, mediante muestreadores pasivos de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, ozono, compuestos orgánicos volátiles, específicamente benceno, tolueno, y xilenos (BTX), entre otras determinaciones. Se monitoreó por un año en quince puntos del área metropolitana y lograron identificar zonas críticas y evaluar de manera sencilla las tendencias de contaminación atmosférica [Sánchez, 2008].

En Valencia, España, el Centro Superior de Investigaciones en Salud Pública, de conjunto con otras entidades desarrollaron un estudio de variación espacial de la exposición a dióxido de nitrógeno (NO_2) en la ciudad de Valencia, y su relación con la situación socioeconómica y la edad. Los niveles de NO_2 se midieron en 100 puntos del área de estudio, mediante captadores pasivos en tres campañas entre 2002 y 2004. El método utilizado permitió conformar mapas de contaminación y describir la relación entre los

niveles de NO_2 y las características sociodemográficas [Estarlich, 2012].

Con los ejemplos expuestos queda demostrado el protagonismo que ha ido ganando el captador pasivo en el campo de la medición de contaminantes atmosféricos, siendo una herramienta útil y confiable.

2. Fundamentos básicos de los captadores pasivos

Los dispositivos de muestreo pasivo generalmente tienen forma tubular o de disco, y captan un contaminante específico mediante la adsorción y(o) absorción en un sustrato químico determinado. Después de su exposición, que puede variar desde unas horas hasta un mes, la muestra es llevada al laboratorio, donde ocurre la desorción del contaminante y el posterior análisis cuantitativo [Cano, 2009].

El principio de funcionamiento de los muestreadores pasivos se basa en la difusión, donde un contaminante gaseoso atmosférico pasa a través del muestreador y queda retenido en él por la sustancia captadora, siendo la concentración retenida dependiente del tiempo de muestreo y de la eficiencia de captación del gas en el muestreador, según la 1ra Ley de Fick [Cano, 2009; Plaisance, Sagnier, Saison, Galloo, Guillermo, 2002].

Se han desarrollado numerosos tipos de muestreadores para el control de la calidad del aire basados en los tubos Palmes originales (Fig. 1). En cada caso el área o la longitud de la trayectoria de difusión se modifica para lograr el objetivo de muestreo deseado. En particular, se utilizan muestreadores tubulares o de disco. Los muestreadores de tipo tubo generalmente son cilíndricos, huecos y orientados verticalmente; una de sus tapas en el extremo superior tiene una malla o rejilla de acero inoxidable o un papel de filtro impregnado con el absorbente que recoge el gas de interés. El extremo inferior del tubo se deja abierto o se recubre con una membrana.

El funcionamiento del captador pasivo depende críticamente de la selección y uso del absorbente adecuado, el cual debe tener una eficiencia de absorción elevada para el contaminante a medir [Cano, 2009].

El éxito en el uso de los muestreadores difusivos en el aire ambiente requiere de un entendimiento de los principios de operación y del análisis de los factores ambientales que pue-

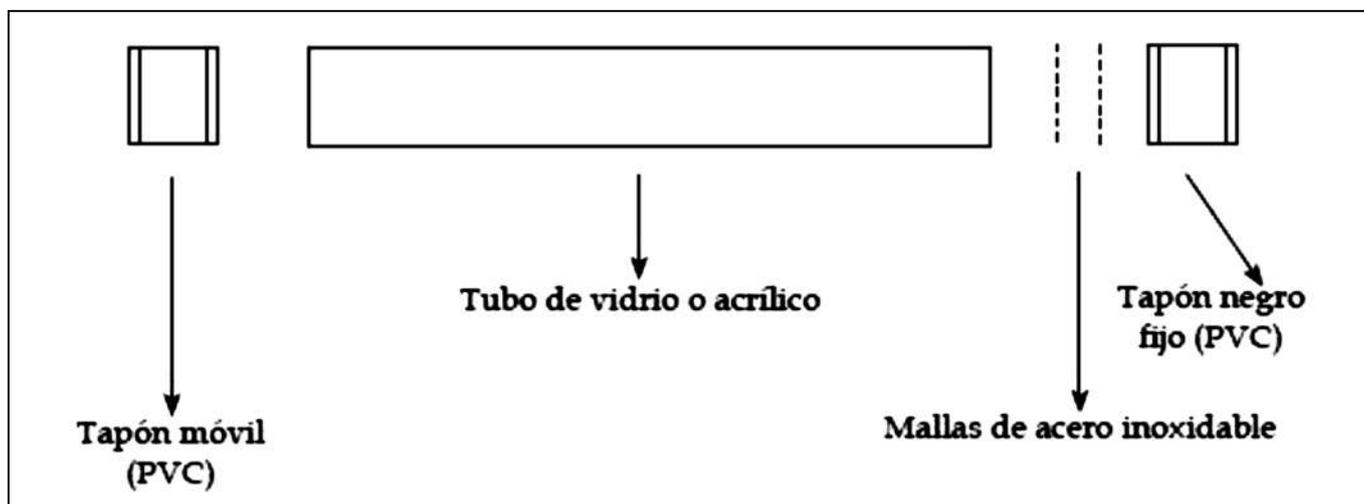


Fig. 1. Esquema de un captador pasivo de NO_2 .

den afectar la efectividad del captador [Brown, 2000]. Entre ellos destacan la velocidad del aire, variaciones bruscas de la concentración de contaminantes y la temperatura. El más importante de todos ellos es la temperatura y la presión, las cuales afectan directamente el coeficiente de difusión y pueden afectar también la capacidad de absorción del adsorbente. Además, la humedad también influye afectando la capacidad del adsorbente [Brown, 2002].

3. Captadores pasivos Radiello

Los captadores pasivos tradicionales presentan una simetría axial que generalmente tiene pobre sensibilidad y reproducibilidad, limitada por su geometría. Los valores de la velocidad de absorción son generalmente bajos y varían dependiendo de las condiciones ambientales.

Según el Manual Radiello, sus captadores pasivos presentan una simetría radial con una tasa de absorción alta, ya que esta varía exponencialmente con la relación superficie de difusión y longitud de la trayectoria de difusión. Cuenta con un cuerpo difusivo repelente al agua, por lo que es capaz de funcionar bajo condiciones meteorológicas adversas. Poseen bajos límites de detección y altas capacidades de adsorción que permiten que el tiempo de exposición varíe de 15 minutos a 30 días. Permiten la desorción térmica y los análisis por cromatografía de gases y espectrometría de masas, ampliando la gama de contaminantes gaseosos que pueden ser cuantificados.

El muestreador difusivo Radiello (Fig. 2) funciona como una caja cerrada, generalmente cilíndrica, con un cuerpo difusor denominado superficie difusiva, que resulta trans-

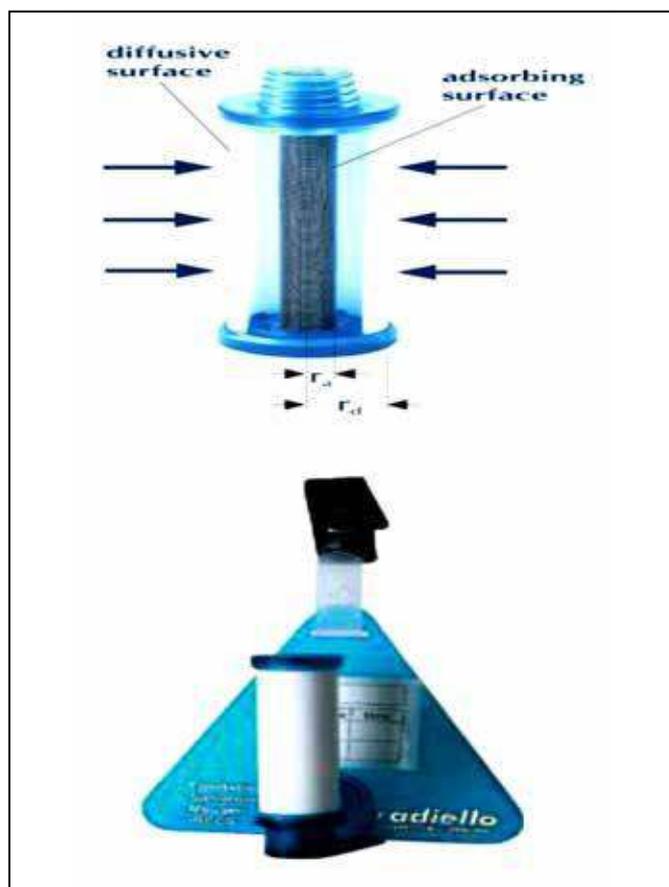


Fig. 2. Captador pasivo Radiello.

parente para las moléculas gaseosas que lo atraviesan y quedan retenidas en el cartucho adsorbente, denominado superficie de adsorción. Vienen impregnados y listos para usar. Cada contaminante tiene un cartucho adsorbente específico, así como un cuerpo difusor. Los análisis de laboratorio se realizan según las técnicas convencionales o los procedimientos descritos en el Manual Radiello.

4. Uso de captadores pasivos en Cuba

Desde la década del 70, en Cuba se realizan acciones de prevención y control de la contaminación del aire. Con vista al perfeccionamiento de ese trabajo, surge la iniciativa de integrar, por vía de proyectos, las Unidades de Observación, Diagnóstico y Pronóstico de la Contaminación Atmosférica, a estudios que garantizan las acciones de prevención y control. Se han cuantificado en pequeña escala los óxidos de nitrógeno según la técnica establecida por el Centro de Contaminación y Química de la Atmósfera (Cecont) del Instituto Nacional de Meteorología (Insmet), basada en una modificación de la reacción de Griess-Saltzman. De manera general estos estudios han estado encaminados a vincular la calidad de aire con su influencia sobre la salud humana, teniendo en cuenta que, en el mundo, las enfermedades con una alta tasa de mortalidad e incidencia tales como el cáncer de pulmón y las enfermedades cardiovasculares o respiratorias, están estrechamente relacionadas con los efectos dañinos de la contaminación atmosférica. También el Centro de Investigación del Petróleo (Ceinpet) realiza estudios de diagnóstico ambiental en las áreas de interés con el analizador automático Multiwarn II, basado en un método electroquímico [Sosa-Rodríguez, 2010].

El Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNIC) desarrolló un estudio de determinación de concentración de dióxido de nitrógeno en la atmósfera de la ciudad de La Habana mediante captadores pasivos tradicionales tipo Palmes. En dicha investigación se evaluó la posible relación que existe entre el volumen de tráfico y la concentración de contaminantes en algunos puntos de muestreo durante un mes, como preámbulo a un trabajo más ampliado de los demás factores que influyen en la calidad del aire. Se emplearon captadores pasivos impregnados con trietanolamina. El estudio resultó ser muy efectivo, obteniéndose resultados congruentes con el nivel de tráfico en cada uno de los puntos de muestreo [Regueira, 2009].

La Universidad Central de Las Villas realizó una cuantificación del dióxido de nitrógeno en una zona de la ciudad de Santa Clara con el uso de captadores pasivos Radiello durante el año 2010, con el objetivo de conocer los niveles de dicho contaminante en los dos períodos estacionales, invierno y verano. Los captadores se analizaron mediante la técnica de espectrofotometría ultravioleta visible UV-VIS [Sosa-Rodríguez, 2011]. También realizó la validación parcial de las técnicas analíticas por espectrofotometría ultravioleta visible UV-VIS para la cuantificación del dióxido de nitrógeno y ozono troposférico con estos captadores [Sosa-Rodríguez, 2010].

El Instituto Nacional de Meteorología también ha desarrollado investigaciones con captadores pasivos Radiello, obteniendo buenos resultados. En el proyecto «Contribución a la gestión de la calidad del aire en Cuba: Gases contami-

nantes y componentes químicos de la lluvia y su relación con las fuentes de emisión y condiciones meteorológicas», se realizó una campaña de monitoreo donde se cuantificaron las inmisiones de NO₂ y SO₂ en varios puntos de La Habana durante el período diciembre 2013 a mayo 2014. Estos resultados fueron la base para determinar la ubicación de estaciones fijas automáticas en el municipio de San Miguel del Padrón y en el Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, para el monitoreo permanente de la contaminación atmosférica en La Habana [López, 2014].

Este proyecto sirvió de base para la posterior cuantificación de otros contaminantes de la calidad del aire en La Habana, con la utilización de muestreadores pasivos Radiello, ampliándose la determinación además a otros tres contaminantes importantes: sulfuro de hidrógeno, ozono y amoníaco.

El Centro de Estudios de Ingeniería de Procesos (Cipro), Departamento de Contaminación Atmosférica, Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Tecnológica de la Habana, en colaboración con el Instituto de Meteorología realizó determinaciones de dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre en áreas de la de la Universidad. El monitoreo con muestreadores Radiello se llevó a cabo en el período diciembre 2013 a mayo 2014. El pasivo se expuso por quincenas y el análisis químico se realizó por espectrofotometría ultravioleta visible para el caso del dióxido de nitrógeno, y por cromatografía de intercambio iónico para el dióxido de azufre, encontrándose que la concentración determinada para los contaminantes es directamente proporcional a la del ambiente [Barcelona *et al.*, 2015].

El Centro de Ingeniería e Investigaciones Químicas desarrolla estudios medioambientales dirigidos fundamentalmente a servicios de monitoreo de contaminación de aire por fuentes fijas y de aguas residuales, que ofrece a diversas entidades de nuestro país. La introducción de este tipo de captador pasivo Radiello resultaría en la práctica un instrumento valioso en la validación de las metodologías aplicadas para la evaluación de la calidad del aire.

Conclusiones

Este trabajo proporciona una revisión del estado actual del monitoreo pasivo a nivel internacional y en Cuba. Se evidencia en la bibliografía consultada que los estudios realizados con este tipo de muestreador arrojaron buenos resultados en cuanto al monitoreo de la concentración de contaminantes atmosféricos específicos, permitiendo la caracterización de diversos ambientes expuestos a determinadas cargas de contaminantes. Se muestra el avance que ha tenido el captador pasivo, exponiéndose las ventajas que presenta el captador pasivo Radiello con respecto a los tradicionales tubos tipo Palmes, debido a su simetría radial, bajo costo de operación y sencillez de los métodos analíticos involucrados. Entre los resultados más significativos del uso del captador pasivo Radiello en Cuba se muestran los obtenidos por la Universidad Central de Las Villas y el Centro de Contaminación y Química de la Atmósfera del Instituto de Meteorología.

Referencias

- ADON, M. *ET AL.* (2010). «Long term measurements of sulfur dioxide, nitrogen dioxide, ammonia, nitric acid and ozone in Africa using passive samplers». *ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND PHYSICS*. www.atmos-chem-phys.net/10/7467/2010/. Visitado: 31 de octubre de 2016.
- ANDRES, D. A.; E. J. FERRERO Y C. E. MACKLER (2000). «Monitoreo de contaminantes del aire en la ciudad de Rosario-Argentina». *Información Tecnológica*, Vol.8 No 6 – 1997. ISSN 0716-8757.
- BARCELONA CAZANAVE, L. *ET AL.* (2015). «Calidad del aire en la Ciudad Universitaria José Antonio Echeverría por partículas e inmisiones de NO₂ y SO₂». *UCE Ciencia*. Revista de postgrado, [S.l.], v. 3, n. 3, oct. 2015. ISSN 2306-3556. Disponible en: <<http://www.uceciencia.edu.do/index.php/OJS/article/view/58>>. Fecha de acceso: 31 Oct. 2016
- BARRENETXEA, C.; A. SERRANO, M. DELGADO, F. VIDAL Y J. ALFAYATE BLANCO (2003). *Contaminación ambiental. Una visión desde la química*. International Thomson Editores Spain Parainfo S.A., Madrid, España.
- BOTKIN, D. Y E. KELLER (2000). *Environmental Science. Earth as a Living Planet*. 3ra. edición. Ed. John Wiley & Sons Inc, USA.
- BOWER, J. Y G. BROUGHTON (1991). «Urban NO₂ Concentrations in the U.K. in 1987». *Atmospheric Environment*: 25, 267-283.
- BROWN, R. H. (2000). «Monitoring the ambient environment with diffusive samplers: theory and practical considerations». *Journal of Environmental Monitoring*, 2(1): 1-9. Visitado: 21 de octubre de 2016.
- BROWN, R. H. (2002). «General principles of diffusive sampling. In: E. De Saeger (Editor)». The proceedings of the International Conference Measuring Air Pollutants by Diffusive Sampling held in Montpellier, 26-28 September 2001. European Communities.
- CANO, V. Y J. M. DELGADO SABORIT (2009). «Medida de Contaminantes Atmosféricos»: Métodos Pasivos frente a Métodos Automáticos. Universidad Jaume I de Castellón Castellón, Departamento de Química Inorgánica Inorgánica y Orgánica. www.upv.es/upl/Uo455041.pdf
- CAPE, J. N. (2009). «The use of passive diffusion tubes for measuring concentrations of nitrogen dioxide in air». *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. 39, 289-310.
- ESTARLICH, MARISA *ET AL.* (2012). «Variación espacial de la exposición a contaminación atmosférica en la ciudad de Valencia y su relación con un índice de privación». Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados. Visitado: 2 de diciembre de 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gaceta.2012.05.010>.
- GODISH, T. (1991). *Air Quality*. Lewis Publishers, Chelsea, Michigan, second edition, 421 pp.
- LÓPEZ, R. (2014). El portal de Medio Ambiente en Cuba. Disponible: www.medioambiente.cu [Consultado 17 noviembre 2015]
- MASKEY, R. *ET AL.* (2012). «Passive Sampling of Ambient Nitrogen Dioxide Using Local Tubes». *Journal of Environmental Protection* Vol. 3 No. 2 (2012), Article ID: 17444, 10 pages DOI:10.4236/jep.2012.32022 Visitado: 13 de septiembre de 2016.
- Namiesnik, J.; B. Zabiegala, A. Kot-Wasik, M. Partyka, y A. Wasik (2005). «Passive sampling and/or extraction techniques in environmental analysis: a review». *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 381, 279-301.
- ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, «Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. Nota descriptiva». Actualización de septiembre de 2016 <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>. Visitado: 25 de octubre de 2016.
- PIRE, S. F. Y L. ZUMALACÁRREGUI (2002). «Combustión y Contaminación atmosférica». Monografía. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría: La Habana, Cuba.

- PLAISANCE, H; J. SAGNIER, J. Y. SAISON, J. C. GALLOO Y R. GUILLERMO (2002). «Performances and Application of Passive Sampling Method for the Simultaneous Determination of Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide in Ambient Air». *Environmental Monitoring and Assessment*, 79, 301-315.
- REGUEIRA, M. *ET AL.* (2009). «Determinación de la concentración de dióxido de nitrógeno en la atmósfera de ciudad de La Habana mediante captadores pasivos». *Revista CENIC. Ciencias Químicas* [en línea] 2009, 40 (Enero-Abril): [Fecha de consulta: 26 de octubre de 2016] Disponible en: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181621659004>> ISSN 1015-8553
- RADIELLO OFFICIAL WEBSITE Disponible: www.radiello.com/english/no2_en.htm2011 «Manual Radiello» [Consultado 8 septiembre 2015]
- SALEM, A. A.; A. A. SOLIMAN Y I. A. EL-HATY (2009). «Determination of nitrogen dioxide, sulfur dioxide, ozone, and ammonia in ambient air using the passive sampling method associated with ion chromatographic and potentiometric analyses». *Air Quality, Atmosphere, & Health*, 2(3), 133-145. <http://doi.org/10.1007/s11869-009-0040-4>
- SOSA RODRÍGUEZ, D. *ET AL.* (2010). «Validación de las técnicas analíticas y de los métodos de medida en el laboratorio para la cuantificación de dióxido de nitrógeno y ozono troposférico». Tesis Doctoral. Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
- Sosa Rodríguez, D. *ET AL.* (2011). «Cuantificación de dióxido de nitrógeno con captadores pasivos tipo Radiello». *Revista Cubana de Química* [en línea] 2011, XXIII (): [Fecha de consulta: 31 de octubre de 2016] Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443543723010>> ISSN 0258-5995
- UNEP, UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (1998). «Protecting our Plañet. Securing our Future. Linkages among global environmental issues and human needs». US National Administration and Space Administration, the World Bank.
- VARDOULAKIS, S; J. LUMBRERAS Y E. SOLAZZO (2009). «Comparative evaluation of nitrogen oxides and ozone passive diffusion tubes for exposure studies». *Atmospheric Environment*, 43, 2509-2517.
- ZAPATA SÁNCHEZ, CARMEN ELENA *ET AL.* (2009). «Fortalecimiento de la red de monitoreo de calidad de aire en el valle de aburra con medidores pasivos». «GESTIÓN Y AMBIENTE». Vol. 11, No. 1 (2008); 67-84 *Gestión y Ambiente*; Vol. 11, núm. 1 (2008); 67-84 2357-5905 0124-177X. [Citado 2016 Nov 4].



Evaluación cualitativa de la influencia del diseño arquitectónico en el ambiente interior

Por Dra. Dania González Couret*, Dr. Luis Alberto Rueda Guzmán*, Arq. Mónica Llovet Salazar*, Arq. Nataly González Milián* y Arq. Elizabeth Rodríguez García*.

* Facultad de Arquitectura, Cujae, 114 No 11901 e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba

E-mail: dania@arquitectura.cujae.edu.cu

Resumen

El objetivo de esta ponencia es presentar un enfoque metodológico para la evaluación cualitativa de proyectos arquitectónicos, a partir de la influencia de las variables de diseño en el ambiente interior y su aplicación a un caso de estudio. El procedimiento también puede usarse en el proceso de diseño, para considerar desde el inicio cómo las decisiones proyectuales afectarán el ambiente interior, en aras de generar una forma arquitectónica más apropiada. No solo se ofrecen recomendaciones en términos de principios o estrategias de diseño, sino además variables y parámetros más precisos a tener en cuenta para evaluar proyectos o edificios existentes y también para nuevos diseños. En este enfoque metodológico se identifican tres principales variables de diseño que influyen en el ambiente interior de los edificios: volumen, espacio y envolvente.

Palabras clave: diseño bioclimático; evaluación cualitativa; enfoque metodológico.

Qualitative evaluation of the influence of architectural design on indoor environment

Abstract

The objective of this paper is to present a methodological approach for the qualitative evaluation of architectural projects, based on the influence of design variables on indoor environments, and its application in a case study is taken as an example. The procedure could also be used in the design process to consider, since the very beginning, how the design decisions could affect the indoor built environment, in order to generate the more appropriate architectural form. It offers not only general recommendations in terms of principles or design strategies, but more precise variables and parameters to be taking into account to evaluate existing buildings or projects, and also to design new ones. The three main architectural design variables influencing the indoor environment in buildings identified in this methodological approach are volume, space and envelope.

Key words: bioclimatic design; qualitative evaluation; methodological approach.

Introducción

El principal rol de la arquitectura consiste en proporcionar ambientes interiores confortables para la vida humana, y el diseño arquitectónico constituye un recurso esencial en el logro de ese propósito. Un buen diseño arquitectónico contribuye al logro de ambientes interiores apropiados por medios pasivos, y por tanto, a reducir el consumo de energía para el acondicionamiento artificial, al

aprovechar los recursos naturales disponibles adecuándose al contexto y al clima.

La crisis ecológica de finales del siglo xx y el cambio climático como una de sus principales consecuencias, han generado numerosas acciones internacionales encaminadas a promover la arquitectura de bajo consumo energético o los edificios de energía cero o casi cero [Mazria, 2012]. Se plantea que mediante apropiados diseños arquitectónicos

es posible reducir 95 % de la energía consumida en los edificios, mientras que 5 % restante podría ser suministrado a través de fuentes renovables de energía [Montes de Oca, 2011]. Por otro lado, muchas ciudades han asumido el compromiso de llegar a ser consideradas neutrales para 2050, o incluso antes. El concepto de ciudad neutral implica el cierre de ciclos para el suelo, el agua, los materiales, el aire y la energía [Kimman, 2011].

Pero a pesar de esto, muchos arquitectos aun hoy continúan desarrollando proyectos arquitectónicos que no toman en cuenta el consumo energético durante la vida útil de la edificación. Es usual en conferencias y congresos internacionales, escuchar a los ponentes criticar dicha situación como una tendencia global. ¿Por qué ocurre?

Algunos arquitectos alegan que un diseño energéticamente apropiado es sumamente difícil de lograr por lo complejo de las herramientas requeridas, tales como métodos de cálculo o programas de simulación, aun no suficientemente amigables. A partir de la evaluación de proyectos en los Comités de Expertos del Ministerio de la Construcción en La Habana, se ha demostrado que muchos arquitectos no tienen conocimientos y habilidades suficientes en relación con el diseño bioclimático y la eficiencia energética de los edificios, a pesar de que esos contenidos se incluyeron en el currículo de arquitectos desde los años 70.

Entre las razones que han motivado esta situación, pueden mencionarse, por un lado, la reacción en contra de los procesos de cálculo incluidos en la enseñanza de la arquitectura durante los 70 y 80, y por otro, la actitud asumida por algunos profesores de taller como resultado de su desconocimiento del tema. En estos casos, usualmente manifiestan que esos requerimientos no son importantes para el diseño arquitectónico, que constituyen una limitante para la creatividad e incluso que afectan el resultado estético.

En ocasiones, también los profesores que enseñan los contenidos vinculados al acondicionamiento ambiental (natural o artificial) de los edificios provocan reacciones adversas, tanto en los estudiantes como en los profesores de taller, cuando plantean que cualquier decisión de diseño debe estar subordinada a los requerimientos ambientales. Pero además de las debilidades en el proceso educativo, los inversionistas y los decisores no siempre demandan la aplicación de criterios bioclimáticos en el diseño de los edificios.

Los programas (software) de apoyo al diseño y la evaluación del comportamiento ambiental y energético de los edificios podrían contribuir a facilitar el proceso e incrementar la aplicación de estos conocimientos y principios en la arquitectura, pero hasta hoy estos no resultan aun suficientemente amigables. No son en realidad una herramienta de diseño, sino de evaluación, como resultado de lo cual la labor proyectual se convierte en un largo proceso iterativo de propuestas y evaluación hasta que logre arribarse a la mejor solución.

Por otra parte, los principios de diseño para la arquitectura de bajo consumo energético en función del clima se han identificado como resultado de investigaciones desarrolladas durante más de medio siglo, pero constituyen solo una guía general no muy útil para precisar la solución arquitectónica. Esos principios generales pudieran ser complementados con una guía cualitativa para el diseño

y evaluación de proyectos a partir de algunos indicadores cuantitativos útiles para los arquitectos.

El objetivo de esta ponencia es presentar un enfoque metodológico para la evaluación cualitativa de proyectos arquitectónicos a partir de la influencia de las variables de diseño en el ambiente interior, y su aplicación en un caso de estudio. Las variables propuestas sólo incluyen la escala arquitectónica, de manera que la influencia del contexto deberá considerarse de forma independiente y específica. No se ejemplifica en esta ocasión el posible uso de este enfoque en el proceso de diseño.

Antecedentes

Son muchos los trabajos desarrollados y publicados durante el último medio siglo, encaminados a ofrecer estrategias de diseño bioclimático para diferentes tipos de climas. Entre los autores más importantes, hoy considerados clásicos en el tema, fue Olgyay [1963] quien elaboró una versión simplificada de carta bioclimática aplicada a la arquitectura que integra el efecto combinado de la temperatura del aire, la velocidad del viento y la humedad relativa en la sensación térmica percibida por los seres humanos.

Relevantes contribuciones ha aportado Givoni [1998] al asumir la necesidad de incrementar la zona de confort para regiones pobres en condiciones climáticas cálidas, considerando la capacidad de esa población para asimilar ambientes más calurosos, sobre lo cual ya existían propuestas precedentes. Su carta bioclimática incluyó estrategias de diseño que aprovechan la inercia térmica de la masa construida, el enfriamiento evaporativo y la ventilación nocturna para climas cálido–secos, así como la ventilación natural o mecánica en los cálido–húmedos.

Martin Evans [2011] en sus «Triángulos Verdes» ha desarrollado un método diferente para definir las estrategias de diseño sobre la base de los mismos principios, pero usando la temperatura media del aire y la amplitud de oscilación de sus valores (máximo y mínimo). Veinte años atrás, Serra y Coch [1999] enfatizaron en la definición fisiológica y psicológica del ambiente, así como los principios de la sensación y percepción de forma integral, incluyendo la componente estética. A partir de este enfoque, estudiaron los medios naturales para el control ambiental y propuso recomendaciones de diseño según las características generales y específicas del proyecto (la forma general del edificio, sus espacios interiores y las características de la piel).

Las tablas de Mahoney se han usado en los cursos de entrenamiento que ofrece la Universidad de Lund, en Suecia, sobre Arquitectura, Energía y Medio Ambiente [Roselund, 1999], en aras de identificar estrategias de diseño generales y específicas de acuerdo con las condiciones climáticas, partiendo de la humedad relativa y la temperatura del aire para determinar los rangos de confort apropiados. Las estrategias de diseño propuestas incluyen plan general y orientación, espacios, aberturas (tamaño, posición y protección), paredes y techos.

El principal antecedente para el enfoque integrado que se propone en este artículo fue desarrollado en una investigación tutorada por la autora principal y desarrollada por Rueda [2003] en su tesis doctoral defendida más de diez años atrás, sobre la influencia de las variables de diseño

arquitectónico en el consumo de energía en hoteles de sol y playa para el clima cálido-húmedo de Cuba. Ese enfoque ha sido recientemente reconsiderado y adaptado a edificios públicos en general, principalmente aquellos conformados por la repetición de espacios modulares como escuelas, oficinas, hoteles y viviendas, con o sin climatización artificial [Llovet *et al.*, 2013]. Los resultados se exponen en este artículo.

Metodología

Esta investigación fue desarrollada en diversas etapas a lo largo de más de 10 años. A partir de la literatura internacional relacionada con la arquitectura de bajo consumo energético y el diseño bioclimático, se identificaron las principales variables de diseño referidas, así como la forma en que éstas debían ser consideradas, según los parámetros propuestos por diferentes autores.

La Tabla 1, elaborada por Rueda en su Tesis de Doctorado [Rueda, 2013], muestra las variables que influyen en el ambiente interior y el consumo de energía de los edificios, según fueron clasificadas por diez autores seleccionados. Como puede observarse, a pesar de las variaciones en la forma de clasificarlas, hay criterios coincidentes que permiten definir el volumen, el espacio y la envolvente como las principales variables asumidas en el presente trabajo.

Esta clasificación ha sido aplicada en numerosas investigaciones desarrolladas por la autora principal en edificios de apartamentos [González *et al.*, 2013], y ha sido recientemente reconsiderada y precisada para edificios públicos [Llovet *et al.*, 2013], incluyendo los parámetros fundamentales a tener en cuenta para evaluar cada una de las variables en el diseño arquitectónico según las condiciones climáticas específicas.

Los parámetros definidos se han caracterizado e identificado los indicadores para su evaluación, no sólo a partir de investigaciones precedentes referidas en la literatura consultada, sino también sobre la base de los resultados obtenidos en trabajos experimentales desarrollados por los autores mediante simulaciones [González *et al.*, 2013; González *et al.*, 2006] y mediciones de algunos de los parámetros que caracterizan el ambiente interior de los edificios

[González *et al.*, 2006a; González *et al.* 2011], tales como la temperatura del aire y la humedad relativa, o los niveles de iluminación natural.

El enfoque metodológico propuesto también ha sido aplicado a la evaluación cualitativa de algunos edificios en la Universidad de Ciencias Informáticas (UCI), en La Habana, y posteriormente verificados mediante mediciones de la temperatura interior y simulación de la iluminación natural en sus espacios interiores [Llovet *et al.*, 2013]. La investigación experimental para verificar los resultados del análisis cualitativo incluyó mediciones de la temperatura del aire y la humedad relativa usando data loggers marca HOBO, mientras que la temperatura y la humedad relativa del aire interior se simularon mediante el empleo del programa «Energy Plus», considerando la envolvente transformada con la adición de la protección solar.

Resultados y discusión

Como resultado de la investigación realizada se propone un enfoque metodológico para evaluar proyectos arquitectónicos desde el punto de vista bioclimático, que incluye la clasificación de las principales variables de diseño, los parámetros a considerar para su evaluación y los indicadores a estimar en forma cualitativa o cuantitativa para arribar a una evaluación general de la solución arquitectónica.

El procedimiento también puede ser usado en el proceso de diseño para considerar, desde el inicio, cómo las decisiones de diseño podrían afectar el ambiente interior en aras de generar la forma arquitectónica más apropiada.

Enfoque metodológico

El enfoque metodológico propuesto toma como base las variables de diseño anteriormente identificadas: volumen, espacio y envolvente, así como todos los parámetros e indicadores sugeridos para su evaluación, según su influencia en el ambiente interior y por tanto, en el bienestar de los usuarios y el consumo de energía del edificio (Tabla 2). Las tres variables están estrechamente vinculadas, ya que el espacio interior queda delimitado por su envolvente y ambos dan forma al volumen que el edificio proyecta hacia el contexto. La influencia del contexto deberá ser considerada

Tabla 1. Variables que influyen en el ambiente interior y el consumo de energía en los edificios, clasificadas según diez autores seleccionados [Rueda, 2013]

Variables	Autores									
	[12]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]
Contexto	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Volumen	X		X	X		X	X		X	
Envolvente						X				
Espacio			X	X	X	X			X	
Paredes	X	X	X	X	X		X	X	X	X
Ventanas	X	X	X	X	X		X	X	X	X
Elementos de protección solar	X	X	X		X		X	X	X	
Techos	X	X		X	X		X	X	X	X
Aspectos estéticos y culturales				X						
Aspectos históricos y antropológicos				X						

de forma independiente y específica en cada caso, ya que no se incluye en el procedimiento que se presenta.

Tabla 2. Variables de diseño y parámetros considerados en el enfoque metodológico propuesto para evaluar las soluciones arquitectónicas desde el punto de vista bioclimático

Variables de Diseño		Parámetros	
Volumen		Geometría	
		Compacidad	
		Porosidad	
		Esbeltez	
		Tersura	
Espacio		Geometría	
		Volumen y Proporciones	
		Compartimentación y Conexión	
Envolvente	Techos	Forma y Orientación	
		Dimensiones	
		Materiales	
		Superficies exteriores	
	Paredes	Orientación	
		Dimensiones	
		Materiales	
		Superficies exteriores	
			Dispositivos de protección solar
	Ventanas	Orientación	
		Ubicación y Proporciones	
		Dimensiones	
Tipo			
Materiales			
		Dispositivos de protección solar	

Volumen

El volumen generado por el edificio hacia el contexto urbano determina la exposición de la envolvente en diferentes orientaciones y por tanto, la radiación solar incidente que calienta las superficies exteriores, elevando su temperatura, y con ello, el flujo de calor hacia el interior. Desde este punto de vista, el volumen puede caracterizarse a partir de su geometría, compacidad, porosidad, esbeltez y tersura.

La geometría del plan puede generar diversas orientaciones de las paredes exteriores y con ello, requerimientos específicos de diseño para su protección solar. Las geometrías simples identificadas en edificios conformados por espacios modulares y repetitivos (como escuelas, oficinas, hoteles y edificios de vivienda) se pueden clasificar como sencilla o doble, de acuerdo con la relación entre las unidades espaciales y la circulación de acceso. Por su parte, las geometrías complejas pueden ser lineales, de patio, en forma de estrella o de trama (Tabla 3), pero es también posible encontrar combinaciones de ellas.

La geometría simple puede generar solo una orientación para todos los espacios interiores, de manera que sería posible seleccionar la mejor opción. La doble, sin embargo, presenta espacios hacia dos orientaciones, y la de tipo patio aún más, por lo que se dificulta en mayor medida garantizar la protección solar en todos los casos. Algo similar sucede con las geometrías complejas en forma de estrella y trama.

La compacidad se expresa a través de un coeficiente que indica la relación entre la envolvente equivalente en

una esfera de similar volumen, y la del edificio específico estudiado [Serra y Coch, 1999]. En la medida en que la compacidad aumente, la posible radiación solar incidente y el calor ganado a través de la envolvente se reduce para el mismo volumen edificado. Genéricamente, un edificio del tipo patio es menos compacto que otro de forma prismática con igual volumen, pero un cubo es más compacto que un prisma, y el mayor coeficiente de compacidad corresponde a una esfera con el mismo volumen que los casos anteriores.

La porosidad se relaciona con la proporción entre los espacios cerrados y abiertos en el volumen del edificio, o la presencia de huecos en él. Para estimar este parámetro, Serra (1995) solo consideró los pequeños patios existentes con respecto al volumen total [Serra y Coch, 1999], aunque también las perforaciones horizontales del edificio influyen en su desempeño ambiental, no en relación con la ganancia térmica, pero sí con respecto al flujo de viento, porque esas perforaciones hacen al edificio más permeable, lo cual puede contribuir a incrementar la velocidad del viento su través como resultado del efecto Venturi. Es por ello que en esta investigación la porosidad considera la proporción de perforaciones, tanto verticales como horizontales en el volumen edificado (Fig. 1).



Fig. 1. Volumen. Porosidad.

La esbeltez se define como la proporción entre la altura del edificio y el área de piso promedio [Serra y Coch, 1999]. Mientras más esbelto es un edificio, es menos compacto, y la posible radiación solar incidente en la envolvente (y con ello la ganancia térmica) se incrementa. Esbeltez y compacidad son parámetros opuestos.

La tersura se refiere al grado de rugosidad visual de la envolvente del edificio, en dependencia de la cantidad y magnitud de sus protuberancias y deprimidos de hasta un metro de proyección, con respecto a la línea de fachada. Expresa la relación entre la proyección y la superficie total real de la envolvente, considerando las irregularidades mencionadas [Serra y Coch, 1999]. La tersura se afecta con la presencia de aleros, balcones y terrazas que contribuyen a reducir el valor del coeficiente, lo cual es mejor para proteger el edificio de la radiación solar, con respecto a otro con envolvente más tersa. El menor coeficiente de tersura se corresponde con el mayor posible efecto de auto-sombreado del edificio, que se obtiene con balcones corridos en cada piso [Serra y Coch, 1999] (Fig. 2).

Tabla 3. Geometrías simples y complejas

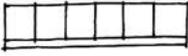
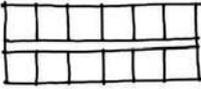
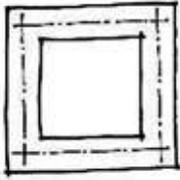
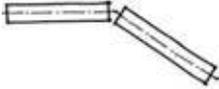
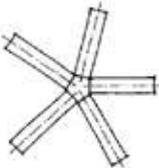
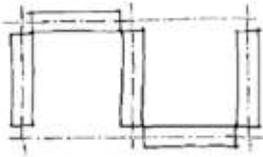
Tipo de geometría	Esquema	Planta Real
Simple	Sencilla	 Facultad de Arquitectura, CUJAE. La Habana, 1965
	Doble	 Edificio «América». Arq. F. Martínez Campos y Pascual Rojas. La Habana, 1941
Compleja	Patio	 «Palacio de los Capitanes Generales». Arq. Fernández Trevejos y Pedro de Medina. La Habana, 1776 - 1791
	Linear	 Edificio «FOCSA». Arq. Ernesto Gómez Sampera. La Habana, 1956
	Estrella	 «Colegio de Belén». Arq. Morales y CIA. La Habana, 1925
Trama	 Escuela Primaria Experimental «Volodia». La Habana, 1973	



Fig. 2. Menor tersura se obtiene con balcones corridos.

Espacio

Los parámetros considerados para evaluar los espacios interiores desde el punto de vista ambiental han sido: geometría, volumen y proporciones, compartimentación y conexión. La geometría refleja la forma del espacio en planta y sus posibilidades de ser conectado con otros. Esto influye en la orientación de las paredes exteriores del espacio, así como en las posibles orientaciones del edificio.

El volumen y las proporciones del espacio se relacionan con la geometría de la planta, pero también dependen del puntal. El volumen del espacio está directamente vinculado a los requerimientos de ventilación higiénica y sus proporciones influyen en la ganancia térmica y en la percepción de los usuarios, en dependencia de la proporción de paredes exteriores o techos expuestos y la distancia entre éstos y las

personas que ocupan el espacio interior, lo cual se expresa a través del ángulo sólido. Los espacios profundos son mejores desde el punto de vista térmico, pero no para la ventilación o la iluminación natural.

Compartimentación y conexión indican el grado de continuidad espacial y permeabilidad interior. Los espacios conectados y permeables son mejores para la ventilación y la iluminación natural, pero los compartimentados resultan preferibles en edificios climatizados.

Envolvente

La envolvente o «piel» del edificio constituye el límite entre el interior y el exterior y debe proteger el espacio interior del sol, el viento, la lluvia, el ruido, la contaminación, las visuales indeseadas y los insectos, entre otros. Pero al mismo tiempo, la envolvente tiene que permitir la requerida ventilación, iluminación natural y las visuales al exterior. Componentes principales de ella son los cierres sólidos y los vanos, es decir, techos, paredes y ventanas.

La transferencia de calor a través de los techos y paredes depende de su forma y orientación, dimensiones, materiales, terminación y color de las superficies exteriores, y la presencia de protección solar. Los techos reciben la mayor intensidad de radiación solar en latitudes tropicales, pero esto depende de su forma y orientación. Las bóvedas y cúpulas reciben menor radiación instantánea que los techos planos, pero no resultan apropiadas para climas lluviosos. A su vez, la radiación promedio incidente en un techo horizontal es mayor que en uno inclinado a un agua hacia cualquier orientación, excepto el sur en el hemisferio norte, o por el contrario, hacia el norte en el hemisferio sur.

La radiación solar incidente también varía de acuerdo con la orientación de la pared exterior. Una pared orientada al norte en el hemisferio norte recibe menos radiación solar promedio anual (aunque ésta es mayor en los meses de verano), y el mayor asoleamiento se obtiene en aquellas orientadas al sur [Matamoros, 1986].

Las dimensiones de los elementos de cierre también influyen en la transferencia térmica y la radiación emitida hacia el espacio interior y sus usuarios, según el ángulo sólido, como ha sido expuesto. Mientras mayores son los elementos de cierre, más cantidad de calor será transferido. Asimismo, la distancia entre el techo o la pared expuesta a la radiación solar y la persona que usa el espacio es inversamente proporcional a la percepción térmica.

La transferencia de calor a través de los elementos de cierre también depende de su coeficiente global de transferencia térmica y de la absorptividad de su superficie exterior. Ambas son directamente proporcionales al flujo de calor, que depende además, de la diferencia de temperatura entre la superficie exterior asoleada y la superficie interior del elemento de cierre. Es por ello que cuando la envolvente está protegida de la radiación solar, la transferencia térmica se reduce o se anula, ya que ambas superficies tienen prácticamente la misma temperatura en espacios con ventilación natural.

Las ventanas son elementos muy complejos que deben desempeñar funciones contradictorias. Una ventana tiene que permitir la ventilación, la iluminación natural y las visuales al exterior, pero al mismo tiempo tiene que proteger el espacio interior de la lluvia, el ruido, las visuales del ex-

terior, e inclusive de la radiación solar directa en la mayoría de los casos. El desempeño de la ventana depende de su orientación, ubicación y proporciones, dimensiones, tipo, material, color y elementos de protección externos.

Las ventanas opacas pueden actuar como dispositivos de protección solar y su efectividad depende de la orientación, que resulta más difícil en el este y el oeste por el bajo ángulo del sol en esas orientaciones para cualquier latitud, por lo cual la protección ofrecida por el contexto constituye un buen complemento.

Además de sus dimensiones, la ubicación y proporción de las ventanas también influye en su desempeño integral. La proporción horizontal es mejor para la iluminación y la ventilación que la vertical, que no favorece la uniformidad. Dos ventanas separadas en una pared exterior son mejores que una sola de las mismas dimensiones totales, porque generan un mejor flujo de viento y mayor uniformidad en la distribución de la luz. A esto último también contribuyen los aleros, al reducir el máximo nivel de iluminación junto a la ventana e incrementar el valor mínimo en el lugar más alejado de esta [González, 1997].

El tipo de ventana debe seleccionarse según los requerimientos del espacio interior, el clima, la orientación y el contexto. El material y el color también influyen en el ambiente interior, por su efecto en la reflectividad, absorptividad y emisividad, e incluso por el deslumbramiento que pueden ocasionar cuando se observa la bóveda celeste a través de la ventana.

En los climas cálido-húmedos, por lo general las ventanas permanecen abiertas para favorecer la ventilación, y sus colores deben ser claros para reducir el contraste entre ésta y la bóveda celeste cuando se mira hacia afuera. Por el contrario, en climas secos donde la tradicional ventana mediterránea permanece cerrada para evitar las visuales directas a los planos bajos y más claros de la bóveda celeste, esta debe ser oscura (como los colores verde, azul o marrón tradicionalmente usados) para reducir el deslumbramiento cuando se observa iluminada por la luz reflejada en el suelo típicamente claro de estas regiones.

La Tabla 2 resume las variables de diseño y los parámetros considerados en el enfoque metodológico propuesto para evaluar las soluciones arquitectónicas desde el punto de vista bioclimático.

Aplicación al caso de estudio

En la investigación realizada por Rueda en 2003 [Rueda, 2003], cuando el presente enfoque fue inicialmente propuesto, la evaluación cualitativa de la influencia de las variables de diseño en el consumo de energía en hoteles de sol y playa en Cuba fue validada mediante un proceso de simulación automatizada con el empleo del software DEROB LTH, usado en aquel momento en los cursos de entrenamiento ofrecidos por la Universidad de Lund, en Suecia.

Diez años después, la metodología fue ajustada y aplicada para evaluar algunos edificios escolares en la Universidad de las Ciencias Informáticas (UCI) en La Habana [Llovet *et al.*, 2013], uno de los cuales se tomó como ejemplo en este artículo. Ese campus universitario construido a inicios del siglo XXI ha sido evaluado desde el punto de vista de la sustentabilidad, en aras de formular propuestas para mejorar su desempeño y reducir su impacto [Llovet *et al.*, 2013].

Algunos de los edificios de mayor consumo energético fueron seleccionados para una evaluación cualitativa en la primera etapa de trabajo, cuyos resultados sirvieron de base en la definición de los espacios interiores a estudiar en la segunda etapa correspondiente a la evaluación cuantitativa, en la cual se realizaron mediciones de la temperatura y la humedad relativa del aire interior, usando data loggers marca HOBO. El trabajo de campo confirmó la evaluación cualitativa realizada sobre la base de la presente metodología.

Teniendo en cuenta los resultados del diagnóstico cualitativo y cuantitativo se ofrecieron recomendaciones para mejorar el desempeño de la envolvente de los edificios, específicamente la protección solar, a partir de una mínima inversión en acciones constructivas. La propuesta consistió en la adición de sombra verde (Figs. 3 y 4) cuyo efecto en la temperatura y la iluminación natural interior fue validado mediante simulación automatizada.



Fig. 3. Fachada original del edificio evaluado.



Fig. 4. Sombra verde adicionada al edificio evaluado.

Como este artículo se refiere al enfoque metodológico para la evaluación cualitativa y su aplicación al caso de estudio, los resultados obtenidos en el trabajo experimental de campo y su comparación con el proceso de simulación serán objeto de atención en futuros artículos. El edificio presentado como caso de estudio está compuesto por tres volúmenes articulados con diferentes geometrías: doble tipo patio; doble lineal y simple lineal (Fig. 5).

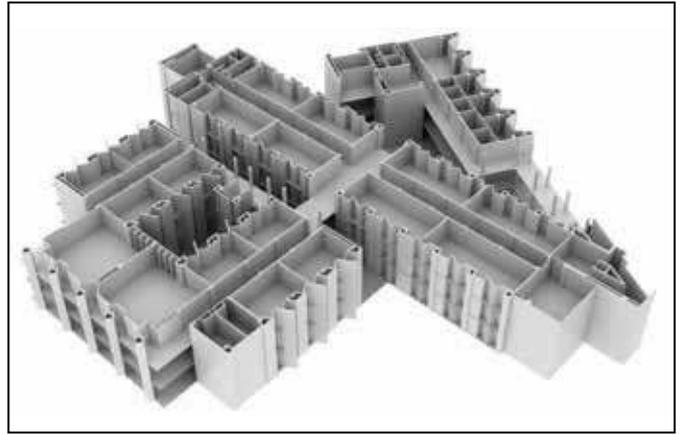


Fig. 5. Geometría del volumen en el edificio evaluado.

El volumen doble tipo patio es compacto (0,64), con baja porosidad debido a las galerías horizontales centrales, parcialmente cerradas al exterior, como resultado de lo cual la ventilación y la iluminación natural interior son escasas. La esbeltez es baja, porque se trata de un edificio compacto de solo cuatro pisos de altura, y la tersura es media (0,67) por las irregularidades de la envolvente con protuberancias verticales que arrojan sombra. Pero como consecuencia de su planimetría simétrica con respecto al eje noroeste-sureste, la protección solar es apropiada en la fachada noreste aunque no en la suroeste. Por tanto, como se demostró posteriormente, la temperatura interior y el consumo de energía son superiores en la fachada suroeste [Llovet *et al.*, 2013].

El volumen doble lineal es también compacto (0,7) con baja porosidad debido a la galería central horizontal parcialmente cerrada al exterior, con resultados similares al edificio doble de patio respecto a la ventilación y la iluminación natural; la esbeltez es igualmente baja y la tersura media (0,7) debido a la envolvente irregular. Sin embargo, como puede observarse en la máscara de sombra, la protección solar ofrecida por ésta es apropiada en la fachada noroeste, pero no en la sureste, excepto cuando es protegida por el otro volumen edificado (el doble de patio).

El volumen simple lineal es, por supuesto, menos compacto (0,56), con baja porosidad porque la galería horizontal es externa y por tanto se considera en la tersura, que es sin embargo alta por la presencia de grandes superficies planas de pared. Como resultado, la ventilación y la iluminación natural son mejores en el volumen más estrecho, y en él las fachadas norte y sur están bien protegidas excepto la pared expuesta, no solo en el sur sino también en el oeste.

La geometría, volumen y proporción de los espacios son similares en todos los casos, porque la mayoría son aulas y laboratorios de computación cerrados y sin conexión entre ellos ni con las galerías de circulación, lo cual afecta la iluminación y la ventilación, incluso en las aulas no climatizadas cuyas ventanas hacia el corredor de circulación se encuentran en la parte superior de la pared y están usualmente cerradas.

La orientación de las paredes depende de la geometría y orientación del volumen edificado. Están construidas con albañilería y terminadas con mortero de cemento, y el color de sus superficies exteriores es generalmente claro, con excepción de algunos elementos que son más llamativos

en la composición. La sombra arrojada sobre las paredes proviene fundamentalmente de protuberancias verticales en la envolvente, no diseñadas para este fin sino por razones estético-visuales y compositivas. Por tanto, no se ajustan a los requerimientos de protección solar para cada orientación.

Algo similar ocurre con las ventanas, cuyas dimensiones, localización y proporciones varían, pero sin estar adecuadamente protegidas del sol. Esto es peor, teniendo en cuenta que en su mayoría son de vidrio.

La aplicación del enfoque metodológico propuesto al análisis cualitativo permite concluir que el edificio en su totalidad es muy compacto y no lo suficientemente poroso para favorecer una adecuada ventilación e iluminación natural, a pesar de que su compacidad reduce la exposición a la radiación solar. Sin embargo, la tersura media hubiera podido resultar positiva para reducir la temperatura interior si hubiese sido adecuadamente diseñada de acuerdo con la orientación.

Conclusiones

El enfoque metodológico propuesto ofrece no solo recomendaciones generales en cuanto a principios o estrategias de diseño, sino variables y parámetros más precisos a tener en cuenta para la evaluación de proyectos o edificios existentes, así como nuevos diseños. Las variables y parámetros definidos influyen en el ambiente interior en cualquier tipo de clima, pero los valores recomendables de los indicadores deben precisarse en cada caso.

Las principales variables de diseño arquitectónico que influyen en el ambiente interior de los edificios identificadas en este enfoque metodológico son el volumen, el espacio y la envolvente. Con independencia de esta clasificación, ellas se encuentran estrechamente vinculadas.

El volumen se caracteriza por su geometría, compacidad, porosidad, esbeltez y tersura, que influyen en la orientación del edificio y sus espacios, la requerida protección solar, la proporción de paredes exteriores expuestas en relación con el espacio interior, la permeabilidad al viento y el efecto de auto-sombreado.

Los parámetros para evaluar el espacio son su geometría, volumen y proporciones, compartimentación y conexión, que reflejan la forma planimétrica e influyen en los requerimientos de ventilación higiénica, así como en la sensación térmica y luminosidad.

Los componentes de la envolvente son los techos, paredes y ventanas, y sus dimensiones, proporciones, posición y protección solar influyen en la potencial transferencia térmica hacia el espacio interior, con independencia del material con el que estén contruidos.

La aplicación del enfoque metodológico propuesto al caso de estudio permitió hacer una evaluación cualitativa de un edificio escolar en la Universidad de Ciencias Informáticas de La Habana, que fue posteriormente validada mediante el análisis cuantitativo. El edificio es demasiado compacto y no suficientemente poroso, lo cual resulta favorable para reducir su exposición a la radiación solar, pero no facilita adecuada ventilación e iluminación natural. Sin embargo, la principal debilidad del diseño es la simetría del volumen no adecuadamente orientado.

Referencias

- EVANS, J. M. (2011). «Los Triángulos de confort: Una nueva herramienta para la sustentabilidad». Conferencia en Segundo Congreso Internacional Medio Ambiente Construido y Desarrollo Sustentable, La Habana.
- GIVONI, B. (1998). *Climate considerations in Building and Urban Design*. Van Nostran Reinhold, New York.
- GONZÁLEZ COURET, D. (1997). *Economía y calidad en la vivienda. Un enfoque cubano*. La Habana: Ed. Científico Técnica.
- GONZÁLEZ COURET, D., A. ZORRILLA Y H. GÓMEZ (2006). «Housing Daylight in Urban Centers. Study Case: Havana». 23rd Conference on Passive Low Energy Architecture, Geneva.
- GONZÁLEZ COURET, D., A. PÉREZ, Y. CHIONG Y Y. LUACES (2006a). «Housing Indoor Environment in the Historic Urban Tissue. Study Case: Havana». World Renewable Energy Congress, Florence.
- GONZÁLEZ COURET, D., Y D. F. ABREU DE LA ROSA (2011). «Volumetric – Spatial design and daylight in apartment buildings. Study case: Havana City». World Renewable Energy Congress–Sweden, 8–13 May, 2011, Linköping, Sweden, Linköping University Electronic Press, Linköpings universitet.
- GONZÁLEZ COURET, D., P. RODRÍGUEZ Y D. F. ABREU (2013). «Influence of architectural design on indoor environment in apartment buildings in Havana». *Renewable Energy* 50, Elsevier, 2013, pp. 800–811.
- KIMMAN, J. (2011). «The Road towards Energy Neutral Cities». Conferencia en World Renewable Energy Congress, Linköping University, Linköping.
- LLOVET, M., N. GONZÁLEZ Y E. RODRÍGUEZ (2013). «Arquitectura sustentable en clima cálido-húmedo. Caso de Estudio: Universidad de las Ciencias Informáticas». Tesis de Diploma. Director: Dania González Couret. Facultad de Arquitectura, Ispjae, La Habana.
- MATAMOROS, M. (1986). «Las cubiertas inclinadas en la vivienda». *Revista Arquitectura y Urbanismo* No. 5, La Habana, pp. 70–75.
- MAZRIA, E. (2012). «Clean Energy: The Future is now». Conferencia en World Renewable Energy Forum, Denver.
- MONTES DE OCA, M. (2011). «Edificios de energía casi nula. Una realidad inminente». Curso de Arquitectura Sostenible P. Romera García (Ed.), Escuela de Arquitectura, Las Palmas de Gran Canarias, 2011, p. 66 – 71.
- OLGYAY, V. (1963). *Design with Climate. Bioclimatic approach to architectural regionalism*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- ROSELUND, H. (1999). «Architecture, Energy and Environment, Housing, Development and Management Tools for Climatic Design». Conferencia en curso Architecture, Energy and Environment, Lund University, Lund.
- RUEDA, L. A. (2003). «Influencia del diseño en la carga térmica y el consumo de energía en habitaciones de hoteles con destino sol y playa en Cuba». Tesis en Director: Dania González Couret. Facultad de Arquitectura, ISPJAE, La Habana.
- SERRA R. Y H. COCH (1999). *Arquitectura y energía natural*. Ediciones UPC, Barcelona.

Externalidades atmosféricas de la quema de biomasa cañera

Por Lic. Alina Roig Rassi*, M. Sc. Elieza Meneses Ruiz*, Ing. Iveitty Soto Guevara*, M. Sc. Diosdado Alonso García* y M. Sc. Ernesto Paz Ortega*

* Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía, Cubaenergía.

E-mail: arrassi@cubaenergia.cu, emeneses@cubaenergia.cu

Resumen

La generación de electricidad a partir de combustibles fósiles produce diferentes impactos negativos. Estos impactos son considerados Costos Externos o Externalidades cuando no son incluidos en los precios del mercado de la energía y por tanto distorsionan las decisiones económicas óptimas. El uso de la biomasa en Cuba para la generación de electricidad se realiza principalmente en centrales azucareros con doble finalidad, la producción de calor y electricidad. En el trabajo se determinan las externalidades atmosféricas del uso de la biomasa como fuente de energía a partir de las emisiones de material particulado. Para esto se empleó la Metodología de Vías de Impacto. Se evaluaron tres centrales considerando tres escenarios: base, mitigación y la expansión de un central. Se obtuvo que los mayores costos totales del daño fueron para el central Uruguay (1,012 MMCUC). Los costos de impacto por kWh de generación en los centrales, resultaron muy superiores a los obtenidos para las CTEs.

Palabras clave: externalidades, biomasa cañera, generación de electricidad.

Atmospheric externalities of the bagasse burning

Abstract

The generation of electricity from fossil fuels produces different negative impacts. These impacts are considered External Costs or Externalities when they are not included in the prices of the energy market and therefore distort optimal economic decisions. The use of bagasse in Cuba for generation of electricity take place mainly in sugar mills with dual purpose, the production of heat and electricity. This work determines the atmospheric externalities of the use of bagasse as an energy source from particulate matter emissions. Was used the Impact Pathway Methodology. Considering three scenarios were evaluated three sugar mills: base, mitigation and the expansion of a plant. The highest damage costs were for Uruguay sugar mill (1,012 MMCUC). Impact costs per kWh of generation at this plants were much higher than obtained for the CTEs.

Key words: externalities, bagasse, electricity generation.

Introducción

El uso de la energía en todas sus formas proporciona un enorme beneficio a la sociedad, sin embargo, también está asociado a numerosos desafíos medioambientales y sociales. La generación de electricidad a partir de combustibles fósiles produce diferentes impactos negativos. Los más significativos son a nivel local la contaminación atmosférica, a nivel regional la lluvia o deposición ácida y a escala global el cambio climático.

Estos impactos provocados por la generación de electricidad son considerados Costos Externos o Externalidades

cuando no son incluidos en los precios del mercado de la energía y por tanto distorsionan las decisiones económicas óptimas. Las sociedades modernas se encuentran ante el reto de poder «internalizar» los costos asociados a esos impactos. Sin embargo, aunque no lleguen a ser propiamente internalizados, el simple hecho de conocerlos ayuda a crear condiciones más favorables para trazar políticas y estrategias con vistas a reducir las emisiones generadas por este sector. Entre ellas podrían incluirse: la introducción de tecnologías de reducción o control de emisiones, el empleo de combustibles más eficientes y(o) menos contaminantes.

etc. Nuestros estudios se enfocan básicamente en los daños provocados por la contaminación atmosférica.

El uso de la biomasa en Cuba para la generación de electricidad se realiza principalmente en centrales azucareros con doble finalidad, la producción de calor y electricidad. En los periodos de zafra los centrales son capaces, a partir de los residuos de la caña, de producir la electricidad que necesitan y entregar el sobrante al Sistema Electroenergético Nacional.

Una capacidad instalada de 755 MW se espera incorporar paulatinamente hasta 2030 como parte de la estrategia actual de introducción de fuentes renovables. La industria azucarera está llamada a cambiar la matriz energética actual con una participación de 30 % en 2030. Para las nuevas inversiones son indispensables las evaluaciones de impacto ambiental, para verificar si las mismas cumplen las normas ambientales y no agravan los problemas existentes. En el caso de los centrales azucareros los problemas de contaminación atmosférica no son tratados ni están sujetos a normativas. En la actualidad ningún central cuenta con tecnología de control de emisiones de partículas, existiendo quejas de la población por las emisiones de las mismas en poblados cercanos a esas instalaciones.

En este trabajo se determinan las externalidades atmosféricas del uso de la biomasa como fuente de energía a partir de las emisiones material particulado de tres centrales. Se contemplaron tres escenarios:

- Escenario base, considerando las toneladas de bagazo quemadas para la producción de electricidad en 2015 y el factor de emisión de 15,6 lb/ton.
- Escenario de mitigación, donde se considera un proceso controlado con factor de emisión 1,36 lb/ton.
- Escenario de expansión de la CTE Ciro Redondo, donde se consideran duplicadas las emisiones y el flujo del escenario base.

Materiales y métodos

La figura 1 muestra el ciclo de vida de la biomasa cañera y a partir de las etapas del ciclo de vida se pueden estimar los impactos medioambientales generados en cada una. Aunque sean identificados los impactos, en el caso que describe la figura es necesario poder cuantificarlos.

Las externalidades atmosféricas como consecuencia de la quema de biomasa cañera, debido a la emisión de material particulado, se pueden determinar utilizando la metodología Vías de Impacto [ExternE, 2005]. Esta sigue el camino de los contaminantes desde que son emitidos hasta los receptores afectados, identificando y cuantificando las afectaciones (impactos) para posteriormente estimar los costos asociados.

Esta metodología comprende cuatro etapas (Fig. 2):

1. Caracterización de la fuente emisora: localización, datos de la chimenea y flujos de contaminantes emitidos, entre otros.
2. Dispersión: cálculo del incremento de las concentraciones de los contaminantes emitidos a las regiones afectadas (dominio local y regional), utilizando modelos de dispersión o transporte de contaminantes atmosféricos.
3. Evaluación de impactos: evaluación de funciones exposición-respuesta; las que relacionan un impacto físico observado o síntoma en la salud, con una exposición dada a un contaminante.
4. Costos: evaluación monetaria de los impactos en la salud, de morbilidad y de mortalidad.

1. Método de los factores de emisión para la determinación de las emisiones

Este método se utiliza con frecuencia para calcular las emisiones cuando no están disponibles datos de monitoreo específico para la fuente. Un factor de emisión (FE) es un

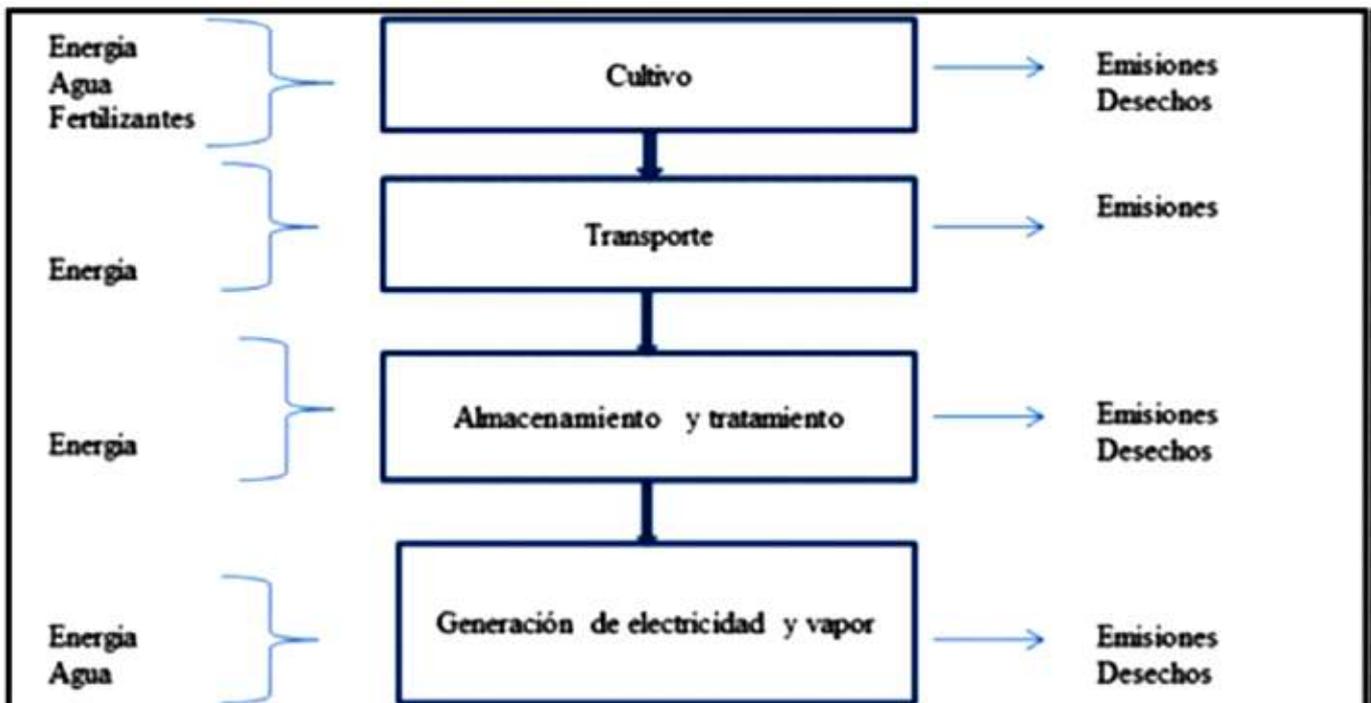


Fig. 1. Ciclo de vida de la biomasa cañera.

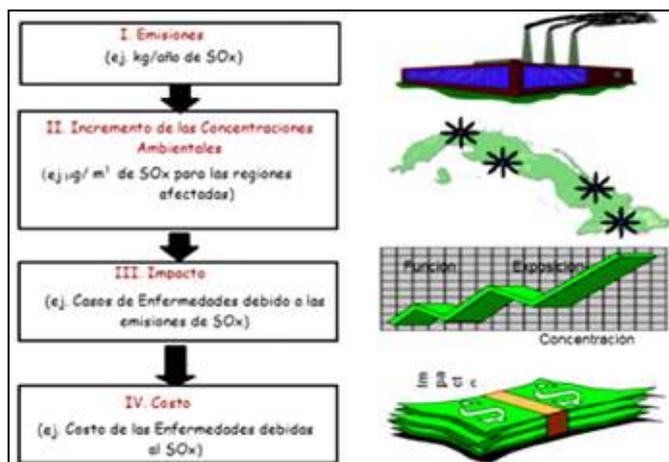


Fig. 2. Metodología Vías de Impacto.

valor representativo que intenta relacionar la cantidad de un contaminante liberado a la atmósfera, con la actividad que genera esa liberación (actividad que pueda ser medida como la cantidad de material procesado o combustible utilizado).

El modelo básico simplificado para el estimado de las emisiones, en su variante más simple, consiste en el producto de al menos dos variables: estadística de actividad (o datos de actividad) y un factor de emisión (FE) típico promedio para esa actividad.

$$E = A * FE * \left(1 - \frac{EC}{100}\right) \quad (1)$$

Donde:

E: tasa de emisión

A: tasa de actividad

FE: factor de emisión

EC: eficiencia de control de la emisión (%)

Para esta investigación se consideró que el factor de emisión es del tipo no controlado, ya que en este caso las tecnologías de quema de biomasa no tienen control de emisión. Por lo tanto, la ecuación 1 queda de la siguiente manera:

$$E = A * FE \quad (2)$$

En los casos modelados se empleó como tasa de actividad las toneladas de bagazo quemado por cada planta. Los FE de emisión empleados fueron 15,6 lb/ton para el caso base y de expansión del central Ciro Redondo, y 1,36 lb/ton para la mitigación donde se asume un entorno controlado con limpiadores húmedos y el factor empleado es teniendo en cuenta una eficacia de 90 % de estos [EPA, 2001b].

2. Dispersión local de contaminantes atmosféricos

Para determinar la dispersión local de contaminantes se utilizó el sistema AERMOD (AERMAP-AERMET-AERMOD). Para el mismo se utilizaron las últimas versiones proporcionadas por la EPA [EPA, 2001] y herramientas de cálculo complementarias desarrolladas por el equipo de Cubaenergía, haciendo las adecuaciones pertinentes para las condiciones del país.

Las características y localización de las fuentes de emisiones contempladas en el estudio se muestran en la tabla 1 y figura 3.

Tabla 1. Factores de emisión para grupos electrógenos (para 4 motores)

ID	Fuente	Altura [m]	Diámetro [m]	Coordenadas en UTM	
				x [m]	y [m]
Jesús Rabí	Una chimenea (centro del dominio)	62	3,65	509 744	249 2301
Uruguay	Dos chimeneas (el centro del dominio es el punto medio entre ambas)	83,5	4,0	689 216,71	2 426 247,88
		70,6	3,8	689 232,53	2 426 329,15
Ciro Redondo	Dos chimeneas (el centro del dominio es el punto medio entre ambas)	83	5,48	736 940,86	2 435 745,60
		83	5,48	736 899,86	2 435 778,60



Fig. 3. Ubicación de las fuentes consideradas en el estudio.

El dominio de modelación empleado para el estudio de la dispersión de los contaminantes fue de 50 x 50 km, 25 km al norte, 25 al este, 25 km al sur y 25 al oeste del punto considerado origen. Dentro del dominio se define una rejilla cartesiana uniformemente espaciada. La rejilla cubre todo el dominio e incluye 121 receptores con separación de 5 x 5 km. En el estudio se contemplan en total 100 celdas.

La tabla 2 muestra los datos utilizados en la modelación de dispersión de las partículas desde la fuente considerada para cada escenario y fuente: flujo másico de emisiones del contaminante en g/s, flujo volumétrico de emisiones de los gases de escape en m³/s y temperatura de salida de los gases de la combustión en grados K.

Para la evaluación se consideró que el tamaño de 90 % de las partículas emitidas eran igual o menor a 10 µm.

Los valores de concentraciones que se obtienen a partir de la modelación de la dispersión se comparan con valores de referencia. Para esto se emplearon los establecidos en la nueva norma cubana NC 1020: 2014 [NC 1020: 2014]. En la tabla 3 se muestran estos valores de referencia para distintos períodos de modelación.

3. Evaluación de impactos y costos

La medición del impacto de la contaminación atmosférica sobre la salud se realiza a través de «funciones exposición-respuesta» (FER), las que relacionan el incremento de los niveles de concentración de los contaminantes durante un período de tiempo (exposición) con el incremento de la probabilidad de ocurrencia del efecto adverso (riesgo), determinando la proporción de sujetos afectados en la población (respuesta) [Rabl, 2002; WHO, 2000].

Este estudio propone seguir la metodología propuesta por Rabl [2002], y empleada en modelo de acuerdo a la ecuación 3, la cual asume las FER lineales, sin umbral, calculando la pendiente de la FER como el incremento del riesgo relativo (IRR) al impacto, multiplicado por la incidencia base por la fracción de la población en riesgo.

$$S_{FER} = IRR \left(\frac{\%}{\mu\text{g} / \text{m}^3} \right) \cdot \text{Incidencia} \left(\frac{\text{casos}}{\text{receptor} - \text{año}} \right) \cdot f_{pop} \quad (3)$$

Donde fpop se corresponde con la fracción de la población en riesgo, e IRR es el cambio en la tasa de ocurrencia de una enfermedad (efecto adverso o variable respuesta) para una población expuesta al factor de riesgo objeto de

Tabla 2. Principales datos de entrada que se le suministra al Aermod

Escenario	Central	Parámetros	Chim1	Chim2
Base	Uruguay	Emisiones de PM ₁₀	36,27 g/s	18,13 g/s
		Temperatura de salida de los gases	473,15 °K	473,15 °K
		Flujo volumétrico real de los gases de la combustión	142,22 m ³ /s	71,11 m ³ /s
	Jesús Rabí	Emisiones de PM ₁₀	31,79 g/s	-
		Temperatura de salida de los gases	473,15 °K	-
		Flujo volumétrico real de los gases de la combustión	63,19 m ³ /s	-
	Ciro Redondo	Emisiones de PM ₁₀	19,83 g/s	19,83 g/s
		Temperatura de salida de los gases	503,15 °K	503,15 °K
		Flujo volumétrico real de los gases de la combustión	63,21 m ³ /s	63,21 m ³ /s
Mitigación	Uruguay	Emisiones de PM ₁₀	3,15 g/s	1,58 g/s
		Temperatura de salida de los gases	473,15 °K	473,15 °K
		Flujo volumétrico real de los gases de la combustión	142,22 m ³ /s	71,11 m ³ /s
	Jesús Rabí	Emisiones de PM ₁₀	2,8 g/s	-
		Temperatura de salida de los gases	473,15 °K	-
		Flujo volumétrico real de los gases de la combustión	63,19 m ³ /s	-
	Ciro Redondo	Emisiones de PM ₁₀	1,8 g/s	1,8 g/s
		Temperatura de salida de los gases	503,15 °K	503,15 °K
		Flujo volumétrico real de los gases de la combustión	63,21 m ³ /s	63,21 m ³ /s
Expansión	Ciro Redondo	Emisiones de PM ₁₀	39,46 g/s	39,46 g/s
		Temperatura de salida de los gases	503,15 °K	503,15 °K
		Flujo volumétrico real de los gases de la combustión	126,42 m ³ /s	126,42 m ³ /s

Tabla 3. Períodos de modelación y valores de referencia [µg/m³]

Contaminante	Períodos	Valores vigentes
PM ₁₀	1 hora	200 (p 97) ¹
	24 horas	50 (p 99) ²
	promedio anual	30

¹ El 95 o 97 % de las determinaciones del año no deben superar este valor.

² El 98 o 99 % de las determinaciones del año no deben superar este valor.

análisis (en este caso el contaminante), por unidad de cambio en la concentración ambiental ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para un tiempo de exposición promedio dado (horas, día, semanas, año). La tasa natural de incidencia de una enfermedad en particular es la línea base, la cual se expresa en casos al año normalizado por persona (probabilidad individual de sufrir el efecto). Para la mortalidad, la línea base es la tasa anual de mortalidad para el grupo receptor. Este IRR se estima de la misma manera que el coeficiente β , en los estudios log-lineales:

$$IRR = \frac{\ln(RR)}{\Delta C} \quad (4)$$

Donde:

RR: riesgo relativo y es la relación entre la tasa de ocurrencia de un efecto en un grupo poblacional expuesto y otro no expuesto.

Utilizando el valor de pendiente obtenido en la ecuación 3, los casos anuales atribuibles se podrán expresar de la forma siguiente:

$$\Delta Y = \sum S_{FER} (\text{POP } j) (\Delta C_j) \quad (5)$$

Donde:

ΔY : incremento en el número de casos anuales

POPj: número de receptores en la localización j

ΔC_j : cambio anual (variabilidad) en las concentraciones de un contaminante dado en el área j

Las funciones exposición-respuesta más actuales de material particulado han sido obtenidas fundamentalmente para PM_{2.5} o PM₁₀. Teniendo en cuenta que los incrementos de concentraciones se obtuvieron para material particulado total y PM₁₀, se asumirán las siguientes relaciones:

- toxicidad de PM₁₀ igual a 0,6 y la de PM_{2.5} ($S_{FER} \text{ PM}_{10} = 0,6 * S_{FER} \text{ PM}_{2.5}$).
- toxicidad de las PM igual a 0,55 y la de PM₁₀ ($S_{FER} \text{ PM} = 0,55 * S_{FER} \text{ PM}_{10}$).

Estas relaciones han sido utilizadas previamente por otros autores como ExternE [2005] y Ostro [1996].

Para la mortalidad crónica, se estiman los años de vida perdidos (AVP) y se utiliza el valor de pendiente S_{FER} determinada en estudio realizado por Meneses [Meneses *et al.*, 2008], basado en la metodología anterior.

$$S_{FER} = 1.92 \cdot 10^{-4} \text{ AVP}/(\text{persona} \cdot \text{año} \cdot \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ de PM}_{10}) \quad (6)$$

Los estudios desarrollados para la morbilidad son menos frecuentes. En ausencia de estadísticas nacionales que recojan las incidencias de los efectos incluidos en el estudio, se decidió utilizar como referencia la incidencia empleada en los estudios de PM₁₀. Los datos de población se sacaron del anuario estadístico de 2015. El porcentaje de asmáticos se asumió igual a 8 %. En el caso de las funciones obtenidas para niños se decidió aplicarla a una población entre 5-14 años. Los valores considerados son resumidos en la tabla 4.

Tabla 4. Tasa de incidencia base y fracciones de la población

Efecto	Receptores	Incidencia base	Fracción de la población
Bronquitis crónica	≥ 27 años	0,0038	0,63
Infarto agudo de miocardio, no fatal	≥ 65 años	0,017	0,14
Admisiones Hospitalarias, Respiratorias	Población Total	0,014	1
Admisiones Hospitalarias, Cardiovasculares	≥ 65 años	0,010	0,14
Visitas a salas de urgencia (Asma)	Asmáticos	0,094	0,08
Bronquitis aguda niños	Niños (5-14 años)	0,043	0,12
Días laborales perdidos	Adultos (18-65 años)	0,006	0,68
Síntomas respiratorios	Niños (5-14 años)	0,0012	0,12
Mortalidad Crónica	≥ 30 años	0,0078	0,62
Mortalidad Aguda	Población Total	0,0083	1

Tabla 5. Incrementos recomendados

Períodos	Valores vigentes	
Bronquitis crónica	≥ 27 años	0,822
Infarto agudo de miocardio, no fatal	≥ 65 años	0,132
Admisiones hospitalarias, respiratorias	Población total	0,126
Admisiones hospitalarias, cardiovasculares	≥ 65 años	0,042
Visitas a salas de urgencia (asma)	Asmáticos	0,336
Bronquitis aguda niños	Niños (5-14 años)	1,632
Días laborales perdidos	Adultos (18-65 años)	0,460
Síntomas respiratorios	Niños (5-14 años)	1,140
Mortalidad aguda	Población total	-

La tabla 5 muestra un resumen de los incrementos expuestos anteriormente, determinados por Meneses [Meneses *et al.*, 2016].

En sus diferentes fases ExternE ha asumido que una muerte aguda equivale a 6 meses o,5 AVP. Por tanto para el cálculo de la pendiente de la función se utilizará el incremento mostrado en la tabla anterior multiplicada por los AVP/Caso, en este caso 0,5, de acuerdo con la expresión siguiente:

$$S_{FER} = IRR \cdot I_{ref} \cdot 0.5 \text{ AVP} / (\text{persona} \cdot \text{año} \cdot \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ de PM}_{10}) \quad (7)$$

Donde I_{ref} se corresponde con el valor de incidencia base.

Como receptor se seleccionó a la salud por constituir el ser humano el más vulnerable a los efectos de la contaminación atmosférica. El valor total para la sociedad relacionado con un efecto adverso en salud tiene dos componentes: la primera es el costo de la enfermedad para el paciente, donde está incluido el valor total de los recursos médicos usados, más la pérdida de productividad; y la segunda, la voluntad individual a pagar (WTP), entre otras razones para evitar el sufrimiento ocasionado por la enfermedad. La primera puede valorarse con precios de mercado, mientras que la segunda no tiene precios que puedan servir como referencia.

Los costos de mortalidad se valoran utilizando la metodología de voluntad a pagar (VAP). Existen diferentes métodos para estimar dicha voluntad, entre ellos el método de precios hedónicos, diferencias salariales y valoración contingente.

Para seleccionar los costos unitarios a emplear en este estudio se tomaron dos estudios de referencia: los valores propuestos por el proyecto ExternE y los propuestos por U.S. Environmental Protection Agency [EPA, 2017]. Estos costos

son expresados de USD a CUC de acuerdo a la tasa de cambio vigente en 2015, alrededor de 1 [ONEI, 2017]. Para los días laborales perdidos se asume la conversión 1 CUP = 1 USD.

En la tabla 6 se muestra el resumen de los costos utilizados en el estudio.

Tabla 6. Valores de costos expresados en CUC

Efecto	Costo Total
Bronquitis crónica	121 847
Infarto agudo de miocardio, no fatal	51 576
Admisiones hospitalarias respiratorias	121 847
Admisiones hospitalarias cardiovasculares	51 576
Bronquitis aguda niños	8707
Visitas a salas de urgencia (asma)	8803
Días laborales perdidos	30
Síntomas respiratorios	68
AVP. crónico	18 310

Resultados y discusión

Calidad del aire

Las figuras 4 y 5 muestran isolíneas de concentraciones promedios en todo el período evaluado (meses de zafra). Para ningún caso modelado, durante este período, se sobrepasó la norma.

En la tabla 7 se muestran las concentraciones máximas obtenidas para el período modelado. Como se aprecia, en este período no se observan violaciones de la norma.

Sin embargo, cuando se analiza un período de 24 horas se viola la norma de calidad del aire en un área definida por una circunferencia de 5 km alrededor de la fuente emi-

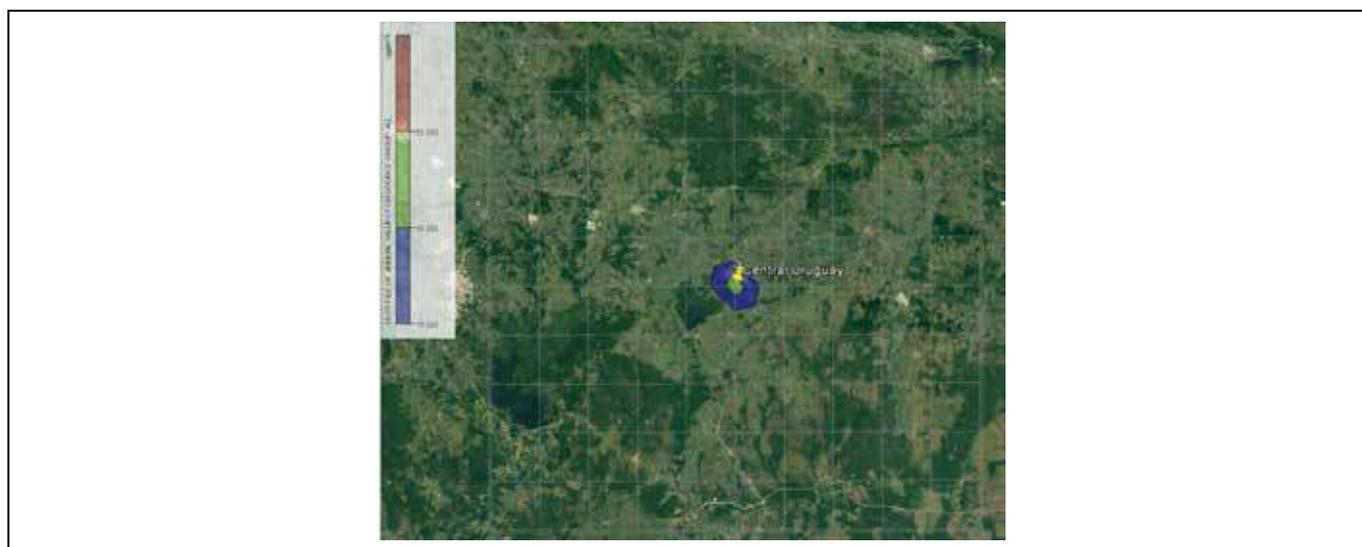


Fig. 4. Isolíneas de concentraciones máximas de PM₁₀ [µg/m³] central Uruguay.

Tabla 7. Concentraciones máximas obtenidas para el tiempo de trabajo del central

Central	Concentración máxima para escenario base de PM ₁₀ [µg/m ³]	Concentración máxima para escenario mitigación PM ₁₀ [µg/m ³]	Concentración máxima para escenario expansión PM ₁₀ [µg/m ³]
Uruguay	38,402	3,346	-
Jesús Rabí	0,631	0,055	-
Ciro Redondo	1,536	0,139	1,917

Tabla 8. Concentraciones máximas obtenidas para 24 horas

Central	Concentración máxima para escenario base de PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Concentración máxima para escenario mitigación PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Concentración máxima para escenario expansión PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Uruguay	475,22	41,42	-
Jesús Rabí	3,05	0,26	-
Ciro Redondo	13,89	1,26	28,72

sora para el caso del central Uruguay. La tabla 8 muestra las concentraciones máximas obtenidas en un período de 24 horas.

Para el período de 24 horas, el valor normado para CMA es de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el cual se sobrepasa en el caso del Central Uruguay en cuatro veces para el escenario base.

Para evaluar el impacto de la calidad de aire, el tamaño de la rejilla debe ser menor que el empleado. Lo recomendado es usar rejillas de $500 \times 500 \text{ m}$ o de $1 \times 1 \text{ km}$, pues las concentraciones se diluyen al aumentar el área de la misma. En este trabajo la determinación de la calidad del aire no es el objetivo principal de estudio.

Costos externos obtenidos para los centrales

Para los centrales azucareros los mayores costos del daño por las emisiones de PM10 fueron para el central Uruguay, seguidos por Ciro Redondo y Jesús Rabí. Estos resultados se muestran en la Tabla 9.

Los valores obtenidos en CUC por tonelada de contaminante emitido, se muestran en la tabla 10. Estos son comparables con los obtenidos para las CTE con áreas de impacto que no incluyen grandes ciudades.

Los costos de impacto por kWh de generación, que se muestran en la tabla 11 son superiores a los obtenidos para las CTE, lo que demuestra que hay un volumen alto de emisiones por generación de electricidad. Esto hace imprescindible un estudio económico con vistas al control de las emisiones

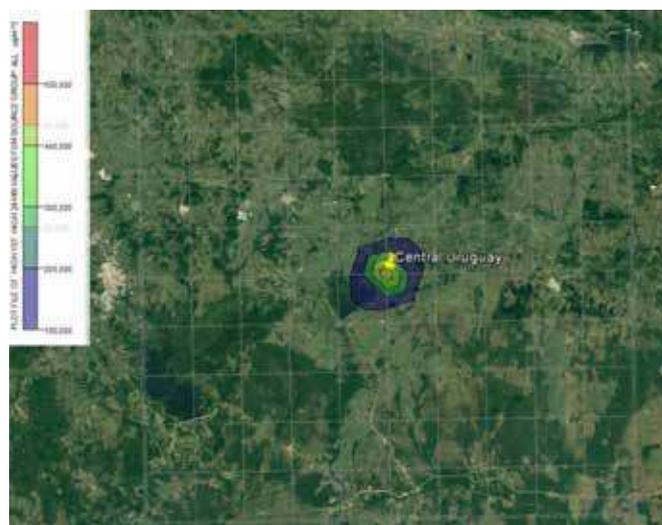


Fig. 5. Isolinias de concentraciones máximas de PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] central Uruguay para 24 horas.

de los centrales azucareros. En el escenario de mitigación estos costos se reducen en un orden.

En el estudio se consideró que toda la biomasa cañera quemada se emplea para generar electricidad y a partir de aquí se determinaron los costos, por lo cual los valores reales deben ser menores pues parte de la biomasa se emplea en generar calor para los procesos del central.

Tabla 9. Costos totales del daño en MCUC por planta, por efecto y tipo de contaminante

Efecto	Escenario base			Escenario mitigación			Escenario expansión
	Uruguay	Jesús Rabí	Ciro Redondo	Uruguay	Jesús Rabí	Ciro Redondo	Ciro Redondo
Bronquitis crónica	256,1517	36,6356	95,9862	22,3153	3,2268	8,7571	148,4758
Infarto agudo de miocardio, no fatal	17,3095	2,4757	6,4863	1,5080	0,2181	0,5918	10,0333
Admisiones hospitalarias, respiratorias	16,4079	2,3467	6,1484	1,4294	0,2067	0,5609	9,5107
Admisiones hospitalarias, cardiovasculares	0,5530	0,0791	0,2072	0,0482	0,0070	0,0189	0,3205
Visitas a salas de urgencia (asma)	0,3131	0,0448	0,1173	0,0273	0,0039	0,0107	0,1815
Bronquitis aguda niños	0,8546	0,1222	0,3203	0,0745	0,0108	0,0292	0,4954
Días de actividad restringida	0,0601	0,0086	0,0225	0,0052	0,0008	0,0021	0,0349
Síntomas respiratorios bajos	0,0119	0,0017	0,0045	0,0010	0,0002	0,0004	0,0069
AVP. crónico	375,5571	53,7134	140,7303	32,7176	4,7309	12,8392	217,6880
Costos Totales	667,2190	95,4278	250,0230	58,1264	8,4051	22,8103	386,7469

Tabla 10. CUC/tonelada de PM10 emitida

Escenarios	Central	\$/ton PM10
Escenario base	Uruguay	388,9
	Jesús Rabí	95,2
	Ciro Redondo	199,9
Escenario mitigación	Uruguay	389,7
	Jesús Rabí	95,2
	Ciro Redondo	200,9
Escenario expansión	Ciro Redondo	155,4

Tabla 11. Centavos de CUC por kWh generado

Escenarios	Central	\$/ton PM10
Escenario base	Uruguay	2,0
	Jesús Rabí	0,8
	Ciro Redondo	0,8
Escenario mitigación	Uruguay	0,2
	Jesús Rabí	0,1
	Ciro Redondo	0,1

Las metodologías propuestas constituyen un análisis de varias metodologías existentes que consideramos se ajustan a las condiciones de Cuba. Sin embargo, teniendo en cuenta que cada caso de estudio tiene sus particularidades existirán impactos que necesiten ser evaluados para casos muy particulares.

Conclusiones

Para los centrales azucareros evaluados los costos totales del daño fueron superiores para el central Uruguay (1137 MMCUC), los que disminuirían considerablemente al considerar una tecnología de control de emisiones.

Los costos de impacto por kWh de generación en los centrales son superiores a los obtenidos para las CTE, lo que demuestra que hay un volumen alto de emisiones por generación de electricidad. Esto hace imprescindible un estudio económico con vistas al control de las emisiones de

los centrales azucareros. En el escenario de mitigación estos costos se reducen en un orden.

Las externalidades ambientales atmosféricas deben ser consideradas, tanto en los estudios de factibilidad económica como en los de planificación como un costo que puede ser evitado.

Referencias

- EPA (2001). «Technology Transfer Network Support Center for Regulatory Atmospheric», http://www.epa.gov/scram001/dis-persion_prefrec.htm#aermod
- EPA (2001b). «Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42», Fifth Edition, Volume I: Stationary Point and Area Sources. Updates 2001 to present.
- EPA (2017). «U.S. Environmental Protection Agency / Office of Air Quality Planning and Standards BenMAP-Environmental Benefits Mapping and Analysis Program, User's Manual». Abt Associates Inc.: US EPA; April 2017.
- EXTERNE (2005). «European Commission, Externe (2005), Externalities of Energy: Methodology 2005 Update», (EUR 21951), Directorate-General XII, Science Research and Development, Office for Official Publications of the European Communities, L-2920, Luxembourg, F75272, Paris, Cedex 06, France.
- MENESES ET AL. (2008). «Programa Nacional Desarrollo Energético Sostenible. Código del proyecto: 00613312, Externalidades del transporte. Propuesta de funciones exposición-respuesta a emplear en los estudios de externalidades del transporte».
- MENESES ET AL. (2016). «Salida de proyecto No. 1-2016: Metodología Evaluación de Impactos y Costos. Proyecto Evaluación de externalidades ambientales de tecnologías energéticas en Cuba». Código: P211LH003-017, Programa Energía Renovable.
- NC 1020: 2014, Calidad del Aire-Contaminantes-Concentraciones Máximas Admisibles y Valores Guías en Zonas Habitables.
- ONEI (2017). «Anuario estadístico de Cuba 2015», www.onei.cu, consultado mayo 2017.
- OSTRO B. (1996). «A Methodology for Estimating Air Pollution Health Effects, World Health Organization», Ginebra.
- RABL. (2002). *Airpacts exposure response functions*. Austria: International Atomic Energy Agency.
- WHO (2000). «World Health Organization. Evaluation and use of epidemiological evidence for environmental health risk assessment». Guideline document. Copenhagen. WHO Regional Office for Europe.





«Un mundo mejor con la energía del Sol»

Primer aviso

La Sociedad Cubana para la Promoción de las Fuentes Renovables de Energía y el Respeto Ambiental (Cubasolar), convoca a la décima tercera edición del Taller Internacional CUBASOLAR 2018, que se celebrará en la provincia de Las Tunas, Cuba, entre el 21 y el 25 de mayo de 2018.

El evento tiene como objetivo contribuir a la construcción consciente de un sistema energético sostenible basado en las fuentes renovables de energía y el respeto ambiental, propiciar y promover el diálogo e intercambio de experiencias y prácticas entre especialistas y personas interesadas en esos temas, la cooperación y la transferencia de conocimientos y tecnologías.

En el Taller se incluyen conferencias magistrales y paneles, en los que participarán autoridades de gobierno, investigadores, educadores, especialistas, gestores, empresarios, profesionales, productores, usuarios de tecnologías y demás personas que trabajan por la sostenibilidad de nuestro planeta.

Temas centrales del evento

- La soberanía alimentaria y las fuentes renovables de energía.
- El abasto de agua y las fuentes renovables de energía.
- Importancia de la cooperación Sur-Sur y Sur-Norte-Sur.
- Soberanía energética, medio ambiente y desarrollo local sostenible.
- Educación, cultura e información energética para la sostenibilidad.

Curso interactivo

El contenido esencial del Taller será el desarrollo del curso (opcional e interactivo) sobre distintas temáticas asociadas al uso de fuentes renovables de energía, la edu-

cación energética y ambiental. El curso se ofrece sin costo adicional, se acredita en esta ocasión en coordinación con la Universidad de Las Tunas y se estructura a partir de diferentes formas organizativas que se integran como parte del programa del evento: conferencias magistrales, conferencias interactivas, seminarios, debates y visitas de campo, favoreciendo un aprendizaje activo que permite la amplia participación y el intercambio sobre las temáticas, y el conocimiento de la experiencia cubana en el actual contexto de desarrollo social y económico del país.

Presentación de trabajos

Los participantes interesados en hacer presentaciones en carteles, deberán enviar por correo electrónico al Comité Organizador un resumen en idioma español, de no más de 500 palabras en formato Word, letra Arial 12 e interlineado a espacio y medio, que contenga: título, autores, país, institución, correo electrónico, objetivos, propuestas o alternativas y resultados logrados o esperados. Los resúmenes deberán enviarse antes del 15 de febrero de 2018. La selección de los trabajos aceptados se dará a conocer a los autores antes del 31 de marzo de 2018.

Los carteles tendrán una superficie total que no excederá los 0,7 m de ancho x 1,0 m de largo y deberán entregarse al Comité Organizador en la oficina de acreditación de la sede del evento.

Publicación de los trabajos en extenso

El Comité Organizador publicará el trabajo en extenso de los autores que lo deseen en el CD del evento. Los interesados deberán enviar el mismo, antes del 30 de abril de 2018 con las siguientes normas: Presentación en versión Microsoft Word, en letra Arial 12 e interlineado a espacio y medio; con 2000 - 5000 palabras (aproximadamente, sin contar los anexos). Con las partes siguientes: Título, Datos del (los) autor (es), Resumen, Palabras clave, Introducción, Desarrollo (que puede incluir Materiales y Métodos, Resultados y Discusión), Conclusiones, Recomendaciones, Referencias o bibliografía, y Anexos (si los tuviera).

De igual forma de resultar de interés para los autores, el trabajo podrá ser evaluado para su publicación en la revista científico digital *Eco Solar* (categorizada en Latindex), y en la revista impresa *Energía y Tú*, de carácter científico popular.

Exposición

Como en ocasiones anteriores, se organizará la Exposición CUBASOLAR 2018, donde se exhibirán los trabajos o ponencias seleccionados en formato de cartel de los participantes.

Inscripción y precios

Para la solicitud de inscripción al evento no es necesaria la presentación de trabajos. La solicitud podrá realizarse directamente al Comité Organizador a través del correo electrónico del evento o al momento de la acreditación.

Los precios y formas de pago se darán a conocer con la publicación de la Convocatoria. El precio de la inscripción otorga el derecho a participar en todas las actividades oficiales, módulo de materiales para el desarrollo de las se-

siones, transportación interna a los lugares previstos del programa, certificados de asistencia y de autor en caso de presentar trabajos.

La agencia de turismo CUBATUR, receptor del evento, ofrece un paquete turístico que cubre los gastos por participante durante el Taller, incluyendo el alojamiento diario en habitaciones dobles del hotel sede. También podrá optarse por la atención paralela a acompañantes, servicios de recibimiento y despedida en aeropuertos cubanos y traslado hasta la sede del evento, regreso al aeropuerto y alojamiento antes y después del evento.

El Comité Organizador les reitera la invitación con la certeza de que lograremos los objetivos comunes en un clima de amistad y solidaridad. Esperamos contar con tu presencia.

Correo electrónico: cubasolar2018@cubasolar.cu

Teléfonos: (53) 72062061 y 72040010.

http:// www.cubasolar.cu

Comité Organizador

Presidente: Lic. Eliseo Gavilán Sáez

Vicepresidenta: M.Sc. Yandira González Mejías

Coordinación general y finanzas: Ing. Dolores Cepillo Méndez

Comité técnico y paneles: Ing. Otto Escalona Pérez

Curso asociado: Lic. Ricardo Bériz Valle

Publicaciones y relatoría: M.Sc. Madelaine Vázquez Gálvez

Certificaciones y transportación: Ing. Miguel González Royo

Organismo receptor: Agencia de Turismo CUBATUR

Correo electrónico: eventos1@cbtevent.cbt.tur.cu

13th International Workshop CUBASOLAR 2018

«A Better World with Solar Energy»

First Call

The Cuban Society for the Promotion of Renewable Energy Sources and Environmental Respect (Cubasolar) summons to participate in the thirteen edition of the International Workshop CUBASOLAR 2018, to be held in Las Tunas province, Cuba, from May 21st- 25th, 2018.

The aim of the workshop is to continue promoting the conscious building of a sustainable energy system based on renewable energy sources and environmental respect, to encourage and promote a dialogue and the exchange of experiences and practices between experts and people interested in these issues: to contribute to the cooperation, capacity building and transfer of knowledge and technology.

The workshop will include master lectures and panels, made up by government officials, researchers, educators, specialists, managers, entrepreneurs, professionals, producers, users of technologies and others who work for the sustainability of our planet.

Thematic lines

- Food sovereignty and renewable energy sources.
- Water supply and renewable energy sources.
- Importance of South-South and South- North-South cooperation.
- Energy sovereignty, environment and sustainable local development.
- Energy education, culture and information for sustainability.

Interactive Course

The essential content of the workshop shall be an optional and interactive course on different topics related to the use of renewable energy sources and to environmental and energy education. The course is offered at no additional cost, and, on this occasion will be accredited by the University of Las Tunas. Master and interactive lectures, discussion seminars, and field visits shall be included in the workshop program, encouraging active learning that would enable not only the broader participation and exchange on the different topics, but also the greater knowledge of the Cuban experience in the current context of social and economic development.

Presentation of papers

Participants interested in poster presentations should send an email to the Organizing Committee, with an abstract in Spanish or English of no more than 500 words in Word format, Arial 12 and in one and a half spacing, containing title, authors, country, institution, email, goals, proposals or alternatives and expected or achieved results. Abstracts should be submitted by February 15th, 2018. Accepted papers will be announced to the authors by March 31st, 2018.

Posters shall have a total area that shall not exceed 0.7 m wide x 1.0 m long and are to be submitted to the Organizing Committee at the accreditation office of the workshop venue.

Comprehensive Publication of Scientific Papers

The Organizing Committee shall include in full, in the CD of the 13th Workshop, all the scientific papers of authors wishing to do so. Those interested should send their scientific articles, before April 30th, 2018, following the hereby specified instructions: Presentation of manuscripts in Microsoft Word format, using 12 point Arial font, one and a half spacing; approximately within a 2000-5000 words in length (excluding annexes). In addition, it should include the following information and sections: title, author(s) data, abstract, keywords, introduction, development (which may include Materials and Methods, Results and Discussion), Conclusions, Recommendations, References or bibliography, and Annexes (if any).

Likewise, if authors wish, articles could be assessed for publication in the scientific journal «Eco Solar» (cate-

gorized in Latindex), and in the popular scientific magazine «Energía y Tú».

Exhibition As on past occasions, the CUBASOLAR Exhibition 2018 will be held, including selected papers or presentations in poster format.

Registration and fees

For the workshop registration, submission of papers is not required. Applicants to participate in the workshop shall directly contact the Organizing Committee via e-mail or at the time of registration.

Fees and payment will be announced with the publication of the Call for Papers. The registration fee entitles you to participate in all official activities, material module for meetings, to use the arranged local means of transportation to the different places specified in the program, as well as to get certificates of attendance and copyright if papers were submitted.

CUBATUR, the receiving tourism agency, offers a tour package covering the costs per participant during the workshop, including daily accommodation in double rooms of the venue hotel. You may also get parallel attention to companions, welcome and farewell services in Cuban airports and transfer to the venue, as well as transportation back to the airport and accommodation before and after the event.

The Organizing Committee reiterates its invitation to participate in the 13th International Workshop, and reassures you that the common objectives will be achieved in a climate of friendship and solidarity. We hope you can join us.

Contact:

E-mail: cubasolar2018@cubasolar.cu

Phone numbers: (53) 72062061 and 72040010.

http:// www.cubasolar.cu

Organizing Committee:

President: BA Eliseo Gavilán Sáez.

Deputy President: M.Sc. Yandira González Mejías

General coordinator and finances: Eng. Dolores Cepillo Méndez

Technical committee and panels: Eng. Otto Escalona Pérez

Associated course: BA Ricardo Bérriz Valle

Publications and proceedings: M.Sc. Madelaine Vázquez Gálvez

Responsible for Certificates and transportation:

Eng. Miguel González Royo

Receiving tourism agency: CUBATUR

E-mail: eventos1@cbtevent.cbt.tur.cu

