



## Evaluación de la exergía de la radiación solar utilizando datos reales

### *Exergy evaluation of solar energy radiation for real data*

Juan José - González Bayón  
Lenin- Pita Cantos  
Rubén- Borrajo Pérez

Recibido: diciembre de 2015  
Aprobado: febrero 2016

#### Resumen/Abstract

El objetivo del trabajo es la evaluación de la exergía de la radiación solar. Comúnmente la exergía de la radiación solar es evaluada según la expresión de Jeter o de Petela. La radiación que llega a la superficie terrestre no es la de un cuerpo negro debido a la presencia de la atmósfera, existiendo radiación directa y radiación difusa. En este trabajo se empleó el método de Pons, que integra los flujos entrópicos de ambos tipos de radiación. Este método es aplicado a datos meteorológicos reales permitiendo determinar el flujo de exergía real de la radiación solar (total, directa y difusa). Como resultado se obtuvo el mejor valor del factor de exergía de la radiación solar (0,867), así como los factores de exergía de la radiación directa (0,911) y de la radiación difusa (0,734), todos para la data meteorológica empleada.

**Palabras clave:** Exergía, exergía de la radiación solar, exergía de la radiación directa, exergía de la radiación difusa.

*The aim of this study is the evaluation of the availability of solar radiation. Commonly the expressions of Jeter or Petela are used to evaluate the exergy of solar radiation. The radiation reaching the surface of the earth is not like a black body radiation due to the presence of the atmosphere, existing direct radiation and diffuse radiation. Therefore, in this paper the Pons's method, which integrates the entropic flows of both types of radiation is used. This approach is applied to real meteorological data allowing to determine the actual exergy flow (total, direct and diffuse) of the solar radiation in the area. As results, the best values of the exergy factor of solar radiation (0,867) and exergy factors related to direct radiation (0,911) and to diffuse radiation (0,734) were obtained for the meteorological data used.*

**Key words:** Exergy, exergy of solar radiation, exergy of direct radiation, exergy of diffuse radiation.

#### INTRODUCCIÓN

Para el diseño y la optimización de los sistemas solares que transforman la energía solar en trabajo o en calor resulta cada vez más común, dada su importancia, determinar el rendimiento exergético de conversión, además del rendimiento energético. Existen muchos autores que emplean el análisis exergético para el tratamiento de los sistemas solares, algunos ejemplos de trabajos recientes en este campo son los siguientes [1-5].

Para poder determinar el rendimiento exergético es necesario determinar, en primer lugar, la cantidad máxima de trabajo que puede ser obtenido de la energía solar, es decir, determinar la exergía que porta la energía solar que alcanza al sistema.

Los modelos para la determinación de la exergía de la radiación solar son varios en la bibliografía, Petela [6], Jeter [7], Spaner [8]. Estos modelos son comúnmente los más empleados y más conocidos, pues resultan realmente bien simples. No obstante, ello no significa que sean los únicos modelos, ni los más adecuados.

Zamfirescu [9] y Pons [10], también han desarrollado modelos para evaluar la exergía de la radiación solar. Ambos modelos, si bien son algo más complejos, consideran los efectos de dispersión y disipación que sufre la radiación al atravesar la atmósfera, los cuales no son considerados por los tres métodos anteriormente mencionados que consideran la radiación solar que llega a la superficie terrestre como radiación de cuerpo negro.

En el trabajo se realiza una revisión de los diferentes modelos de determinación de la exergía de la radiación solar exponiendo sus fundamentos termodinámicos y se realiza la selección de uno de estos modelos para aplicarlo en la determinación de la exergía de la radiación solar.

## MODELOS EXERGÉTICOS DE LA RADIACIÓN SOLAR

Para determinar la exergía de la radiación solar en la Tierra los distintos modelos parten de considerar un esquema bastante general compuesto por una máquina térmica cíclica colocada en la superficie terrestre, tal como está representada en la figura 1. Dicha máquina produce el trabajo máximo por unidad de tiempo (la potencia máxima)  $\dot{w}_{\max}$  que puede ser obtenido del flujo de energía solar proveniente de la fuente solar,  $\dot{e}_s$  y la misma rechaza el flujo de calor  $\dot{q}_o$  al medio ambiente a la temperatura  $T_o$ . De acuerdo a los diferentes modelos la máquina pudiera o no emitir un flujo de energía por radiación al exterior  $\dot{e}_o$ .

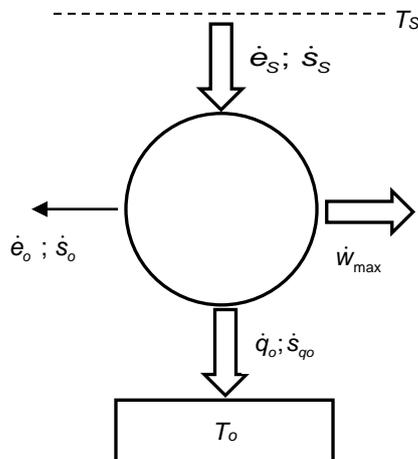


Fig. 1. Esquema del sistema empleado por los diferentes modelos para obtener la exergía de la radiación solar.

La potencia máxima  $\dot{w}_{\max}$  producida por dicha máquina, es el flujo de exergía  $\dot{e}_{x_s}$  de la radiación solar correspondiente al flujo de energía solar  $\dot{e}_s$ . En la figura 1, también han sido colocados los flujos de entropía que acompañan a cada flujo energético.

### Modelo de Jeter

El *modelo de Jeter* [7], parte del esquema mostrado en la figura 1. Este modelo asume que:

- la máquina térmica opera sin emisión de energía por radiación.
- el flujo de energía solar es transferido a la máquina por interacción térmica, es decir, se considera que de alguna forma es posible conectar el extremo caliente de la máquina térmica a la superficie solar a la temperatura  $T_s$  empleando un medio de transporte de la energía que no ofrece resistencia.

Para estas condiciones los balances de energía y de entropía del sistema descrito quedan:  $\dot{e}_s = \dot{e}_{xs} + \dot{q}_o$  y  $\dot{s}_s - (\dot{q}_o / T_o) = 0$ . Combinando ambos balances resulta la ecuación (1):

$$\dot{e}_{xs} = \dot{w}_{\max} = \dot{e}_s - T_o \dot{s}_s \quad (1)$$

Puesto que en el modelo de Jeter se asume la interacción con la energía solar como interacción térmica, entonces,  $\dot{s}_s = \dot{e}_s / T_s$  y por tanto, el flujo de exergía de la radiación solar queda dado por la ecuación (2):

$$\dot{e}_{xs} = \dot{w}_{\max} = \dot{e}_s (1 - T_o / T_s) \quad (2)$$

Así, la eficiencia de conversión del flujo de energía radiante en exergía es dada por la ecuación (3):

$$\eta_J = \dot{e}_{xs} / \dot{e}_s = (1 - T_o / T_s) \quad (3)$$

El resultado es equivalente al rendimiento térmico de una máquina de Carnot que operase entre la temperatura del Sol  $T_s$  y la temperatura ambiente  $T_o$ .

### Modelo de Spanner

El *modelo de Spanner* asume, del mismo modo que Jeter, que la máquina térmica de la figura 1, opera sin emisión de energía por radiación, pero con la diferencia que la energía solar que llega a la máquina es considerada un flujo de radiación.

Si la fuente de energía es radiación, algunas particularidades deben ser tomadas en cuenta. Es conocido que el flujo de radiación del cuerpo negro transporta un flujo de energía específica dado por la ecuación (4):

$$\dot{e} = \sigma T_s^4 \quad (4)$$

y el flujo de entropía específica es dado por la ecuación (5):

$$\dot{s} = (4/3)\sigma T_s^3 \quad (5)$$

donde  $\sigma$  representa la constante de Stefan-Boltzman, como ha sido reportado por [4, 5].

Por tanto, si la fuente es radiación del cuerpo negro, los flujos específicos de energía y de entropía son representados por las ecuaciones (4) y (5) y el flujo de exergía específica obtenido de la ecuación (1), queda como se muestra en la ecuación (6):

$$\dot{e}_{xs} = \dot{w}_{\max} = \dot{e}_s \left(1 - \frac{4 T_o}{3 T_s}\right) = \sigma T_s^4 \left(1 - \frac{4 T_o}{3 T_s}\right) \quad (6)$$

Mientras el rendimiento obtenido es obtenido por la ecuación (7):

$$\eta_s = \dot{e}_{xs} / \dot{e}_s = \left(1 - \frac{4 T_o}{3 T_s}\right) \quad (7)$$

Esta fórmula constituye el modelo de Spanner [8].

### Modelo de Petela

El *modelo de Petela* se apoya también en la figura 1. En el mismo se asume, al igual que lo hizo Spanner, que la energía solar que alcanza el sistema de la figura 1, es un flujo de radiación. Además, en el modelo de Petela, se asume como elemento esencial, que el sistema no puede recibir radiación sin emitir energía radiante a la temperatura ambiente  $T_o$ . El balance de energía del convertidor para este caso resulta:  $\dot{e}_s - \dot{w}_{\max} - \dot{e}_o - \dot{q}_o = 0$  y el balance de entropía queda:  $\dot{s}_s - \dot{s}_o - \dot{q}_o / T_o = 0$ .

Sustituyendo el calor del balance de entropía en el balance energético se obtiene la ecuación (8):

$$\dot{W}_{\max} = (\dot{e}_s - T_o \dot{s}_s) - (\dot{e}_o - T_o \dot{s}_o) = 0 \quad (8)$$

Si como expresa la segunda asunción, se considera que el convertidor es un emisor negro a  $T_o$ , entonces resulta la ecuación (9):

$$(\dot{e}_o - T_o \dot{s}_o) = \sigma T_o^4 - T_o \left( \frac{4}{3} \sigma T_o^3 \right) = -\frac{1}{3} \sigma T_o^4 \quad (9)$$

Combinando este resultado con el de Spanner se tiene que la exergía es dada por la ecuación (10):

$$\dot{e}_{XS} = \dot{W}_{\max} = \sigma T_s^4 \left( 1 - \frac{4}{3} \frac{T_o}{T_s} + \frac{1}{3} \frac{T_o^4}{T_s^4} \right) \quad (10)$$

y el rendimiento o factor de exergía queda expresado por la ecuación (11):

$$\eta_P = \dot{e}_{XS} / \dot{e}_s = \left( 1 - \frac{4}{3} \frac{T_o}{T_s} + \frac{4}{3} \frac{T_o^4}{T_s^4} \right) \quad (11)$$

Esta última es la conocida expresión de Petela [6].

Zamfirescu [9], en su modelo adopta la ecuación (3), pero el introduce una temperatura menor de la radiación que alcanza la superficie terrestre, para considerar el filtro atmosférico.

Pons [10], plantea emplear la expresión de la ecuación (1), para computar el flujo de exergía específica de la radiación solar, pero usando para  $\dot{e}_s$  y  $\dot{s}_s$  los valores medidos sobre la Tierra en diferentes locaciones. En este modelo se considera la diferencia entre radiación del cuerpo negro y la radiación de cuerpo negro diluida, más precisamente la diferencia entre la entropía transportada por estos dos tipos de radiación. Debido a esta particularidad, el modelo de Pons ha sido empleado por otros autores [11,12] y es el seleccionado para la evaluación realizada en este trabajo.

### La radiación solar en la superficie terrestre

La radiación emitida por el Sol puede ser asumida como radiación de un cuerpo negro en su recorrido a través del espacio hasta alcanzar la atmósfera, durante este recorrido la relación entre el flujo de energía y el flujo de entropía se mantiene inalterado. Sin embargo, en su viaje a través de la atmósfera la radiación solar es parcialmente absorbida y difractada, en función de su longitud de onda. Además la radiación solar es parcialmente polarizada.

El modelo de dilución de la radiación del cuerpo negro (DBR *dilutedblack-bodyradiation*), desarrollado por Landsberg and Tonge[apud 10], toma en cuenta los fenómenos dispersivos y disipativos sufridos por la radiación en su paso a través de la atmósfera, introduciendo un factor de dilución (emisividad)  $\varepsilon$ . El Sol es considerado como un cuerpo gris, y los flujos de energía y de entropía específica de la radiación son dados por las ecuaciones (12) y (13):

$$\dot{e}_s = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (12)$$

$$\dot{s}_s = \frac{4}{3} \chi \varepsilon \sigma T_s^3 = \frac{4}{3} \chi \frac{\dot{e}_s}{T_s} \quad (13)$$

siendo la función  $\chi(\varepsilon)$  dada por la ecuación (14):

$$\chi(\varepsilon) = \frac{45}{4\pi^4 \varepsilon} \int_0^\infty x^2 [F(1+f)' F(f)] dx \quad (14)$$

$$F(f) = f \ln f ; f = \frac{\varepsilon}{e^x - 1} ; x = \frac{h\nu}{kT}$$

$x$  representa la frecuencia adimensional y  $f$  el número medio de ocupación de dicha frecuencia. La emisividad  $\varepsilon$  varía en el intervalo de 0 a 1 con independencia de la dirección y la longitud de onda.

Debido a los efectos de absorción y difracción en la atmósfera, la radiación solar llega a la superficie terrestre dividida en dos componentes, radiación solar directa y radiación difusa. Puesto que estas dos componentes están sujetas a diferentes procesos, en términos de generación de entropía son diferentes y no es posible su análisis como una única entidad.

Pons [10] trató las dos componentes de la radiación solar de forma separada, obteniendo las funciones correspondientes al factor de corrección  $\chi$  propuesto por Landsberg y Tongue[apud 10], para la radiación directa y la radiación difusa, ecuaciones (15) y (16):

$$\chi(\varepsilon_{dr}) = 0,973 - 0,275 \ln \varepsilon_{dr} + 0,0273 \varepsilon_{dr} \quad (15)$$

$$\chi(\varepsilon_{df}) = 0,9659 - 0,2776 \ln \varepsilon_{df} \quad (16)$$

La emisividad de la radiación solar directa es determinada según la expresión (17):

$$\varepsilon_{dr} = \frac{\dot{e}_{dr} / (\omega_s \cos \theta)}{\sigma T_s^4 / \pi} \quad (17)$$

siendo  $\dot{e}_{dr}$  la componente vertical de la radiación solar directa;  $\theta$  el ángulo entre la radiación solar directa y la vertical, el cual es función de la latitud de la ubicación y del tiempo y  $\omega_s$  es el ángulo sólido del Sol, que corresponde con el ángulo sólido ocupado por la radiación solar directa.

Mientras la emisividad de la radiación difusa es dada por la ecuación (18):

$$\varepsilon_{df} = \frac{\dot{e}_{df}}{\sigma T_s^4} \quad (18)$$

pues el ángulo sólido de la radiación es el propio hemisferio.

Los flujos de entropía para la radiación directa  $\dot{s}_{dr}$  y para la radiación difusa  $\dot{s}_{df}$  quedan dados por las ecuaciones (19) y (20):

$$\dot{s}_{dr} = \frac{4}{3} \chi(\varepsilon_{dr}) \frac{\dot{e}_{dr}}{T_s} \quad (19)$$

$$\dot{s}_{df} = \frac{4}{3} \chi(\varepsilon_{df}) \frac{\dot{e}_{df}}{T_s} \quad (20)$$

Mientras el flujo de exergía para cada tipo de radiación es determinado según las ecuaciones (21) y (22):

$$\dot{e}_{xdr} = \dot{e}_{dr} - T_o \dot{s}_{dr} \quad (21)$$

$$\dot{e}_{xdf} = \dot{e}_{df} - T_o \dot{s}_{df} \quad (22)$$

Donde:  $T_o$  es la temperatura ambiente media en el período analizado.

Como el flujo de radiación solar es la suma de los flujos de radiación directa y difusa y el flujo de entropía de la radiación solar es la suma de los flujos de entropía de la radiación directa y difusa, entonces el flujo de exergía de la radiación solar puede ser expresado por la ecuación (23):

$$\dot{e}_{xS} = \dot{e}_{xdr} + \dot{e}_{xdf} \quad (23)$$

### Exergía solar a partir de los datos de energía solar

Para aplicar el enfoque propuesto por Pons [10], se necesita disponer de un conjunto de datos meteorológicos sobre la radiación solar directa horaria, la radiación difusa, las horas de Sol, la declinación solar, el ángulo entre la radiación directa y la dirección normal a la superficie terrestre.

Lógicamente, todo este conjunto de datos debe ser obtenido para una ubicación dada, en este caso se empleó latitud norte 22,6° y longitud oeste 82,2°. La fuente de datos meteorológicos empleados en este trabajo es la base de datos de la *NASA Surface Meteorology and Solar Energy*[13], la cual reporta los datos promedios de cada uno de los parámetros considerados a partir del análisis estadístico de la información recogida durante un período de 22 años.

A partir de los datos se determinaron los factores de dilución, la función  $\chi$  y los correspondientes flujos de entropía y de exergía.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El flujo de exergía  $\dot{e}_{x_{dr}}$  correspondiente al flujo de radiación directa  $\dot{e}_{dr}$  se determinó para cada hora del día promedio de cada uno de los meses del año para la localización elegida obteniéndose como resultado el gráfico mostrado en la figura 2, donde se aprecia que  $\dot{e}_{x_{dr}}$  presenta un comportamiento aproximadamente lineal con respecto a  $\dot{e}_{dr}$ , siendo  $\dot{e}_{x_{dr}} \approx 0,914\dot{e}_{dr}$ . Este resultado se corresponde bastante con los obtenidos en [6, 7], las diferencias se deben esencialmente a que emplean diferentes expresiones y diferentes valores para la temperatura ambiental.

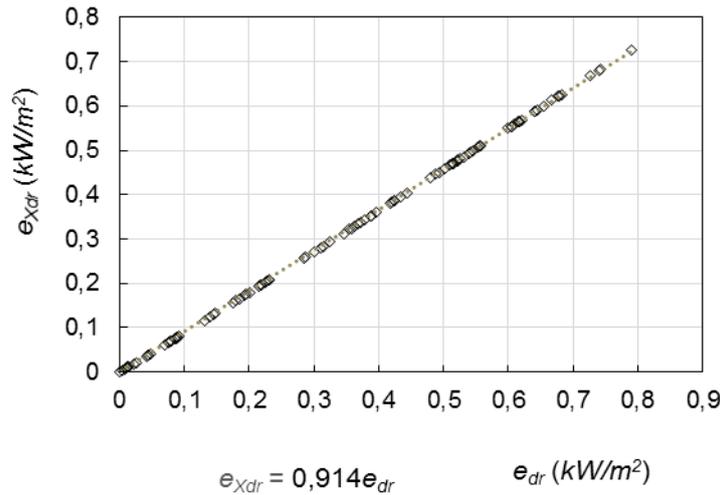


Fig. 2. Flujo de exergía ( $kW/m^2$ ) de la radiación directa versus el flujo de radiación solar directa ( $kW/m^2$ ).

El flujo de exergía  $\dot{e}_{x_{df}}$  correspondiente al flujo de radiación difusa  $\dot{e}_{x_{df}}$  no tiene sentido analizarlo de forma instantánea como la radiación directa, pues el flujo de radiación difusa es considerado constante durante el día y comúnmente solo se dispone de la energía difusa ( $kWh/m^2$ ) de la radiación solar en el día.

El flujo de exergía  $\dot{e}_{x_s} = \dot{e}_{x_{dr}} + \dot{e}_{x_{df}}$  correspondiente al flujo de radiación solar  $\dot{e} = \dot{e}_{dr} + \dot{e}_{df}$  también fue evaluado para cada hora durante todo el año, obteniéndose el gráfico mostrado en la figura 3.a. Considerando todos los valores horarios del día promedio de cada uno de los meses del año, nuevamente aparece un comportamiento aproximadamente lineal entre el flujo exergía de la radiación solar  $\dot{e}_x$  y el flujo de energía de la radiación solar  $\dot{e}$ , obteniéndose que  $\dot{e}_x \approx 0,867\dot{e}$ . Este resultado es muy interesante, porque muestra que el valor del factor de exergía  $\eta = \dot{e}_x / \dot{e} = 0,867$  real para la localización elegida es menor y bien diferente del que se obtendría aplicando las tan conocidas de expresiones de Petela [8] o de Jeter [13], para las mismas temperaturas.

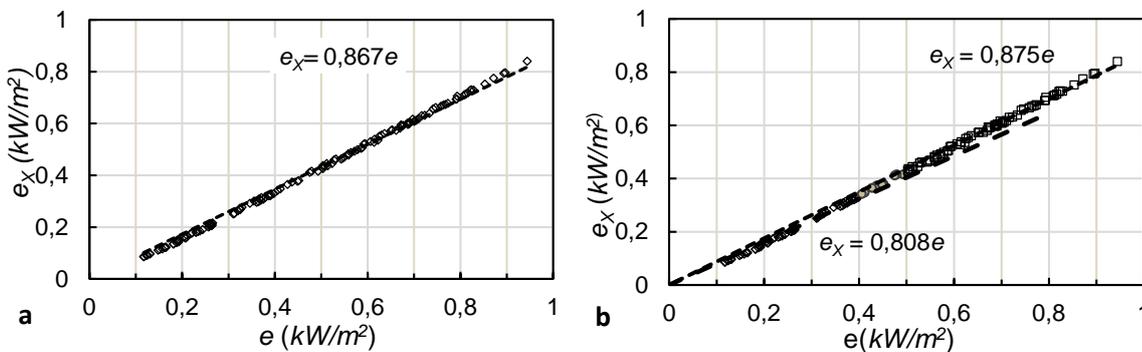


Fig. 3. Flujo de exergía ( $kW/m^2$ ) de la radiación solar versus el flujo de radiación solar ( $kW/m^2$ ).  
 a) Ajuste global. b) Ajustes por intervalos de radiación.

El valor de  $\eta$  obtenido es el mejor valor del análisis de la muestra de todos los flujos de energía solar, es decir, considerando todos los horarios, sin embargo es importante llamar la atención sobre lo siguiente, cuando el flujo de energía solar es bajo, léase  $\dot{e} < 0,4 \text{ kW/m}^2$ , la componente de radiación directa es baja porcentualmente, como se observa en la figura 4, y ésta disminuye cada vez más en la medida que  $\dot{e}$  decrece, esto es debido a que la componente difusa presenta un valor prácticamente constante, de manera que al disminuir  $\dot{e}$  el aporte relativo de  $\dot{e}_{dr}$  a la radiación total se incrementa. Por otro lado, en la figura 4, se observa que para valores de  $\dot{e} > 0,5 \text{ kW/m}^2$  la fracción  $\dot{e}_{dr}/\dot{e}$  supera al 70% y se incrementa en la medida que  $\dot{e}$  crece.

Este resultado tiene un efecto directo sobre el flujo exergético de la radiación solar, pues la componente de radiación difusa posee menor flujo de exergía que la componente radiación directa y por tanto para flujos de radiación solar total pequeños  $\dot{e} < 0,4 \text{ kW/m}^2$ , el factor de exergía  $\eta$  será mucho menor que el valor hallado antes de 0,867, mientras para valores de  $\dot{e} > 0,5 \text{ kW/m}^2$  el factor de exergía  $\eta$  será muy superior al valor hallado. Así se determinó, como muestra la figura 3.b, mediante ajustes por intervalos que el mejor valor de  $\eta$  es 0,808 para  $\dot{e} < 0,4 \text{ kW/m}^2$  y que  $\eta$  debe ser 0,875 para  $\dot{e} > 0,5 \text{ kW/m}^2$ .

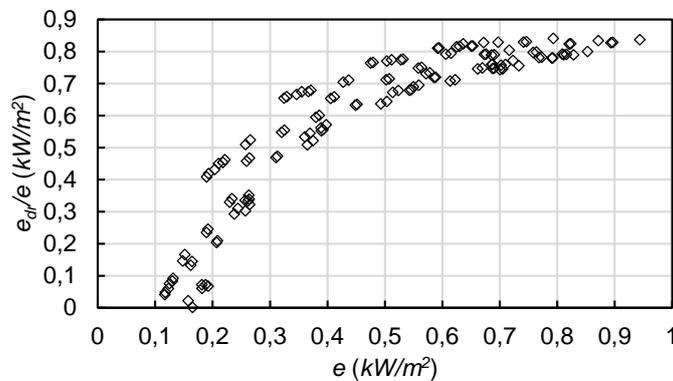


Fig. 4. Razón entre el flujo de radiación solar directa y el de radiación total versus el flujo de radiación total.

El resultado anterior es importante ya que permite establecer valores del factor de exergía más acordes al flujo energético de radiación solar real. Normalmente para las horas tempranas y las horas cercanas a la puesta del sol el flujo de radiación solar es inferior a  $0,4 \text{ kW/m}^2$  (ver figura 5), luego si se evaluara ese intervalo de tiempo es conveniente emplear el factor de exergía promedio correspondiente a esas horas (0,808), del mismo modo es apropiado usar el factor de exergía de 0,875 para el resto de las horas.

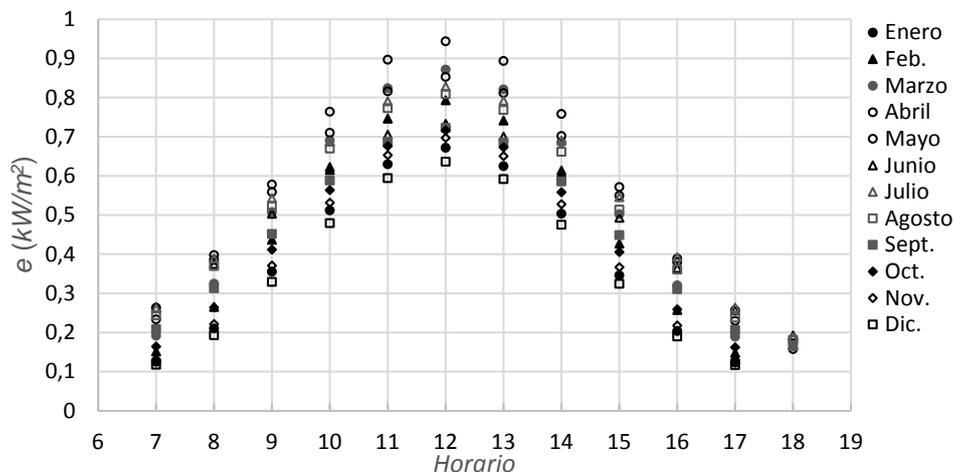


Fig. 5. Flujo de energía solar ( $\text{kW/m}^2$ ) en función del horario del día (valores medios parara cada mes).

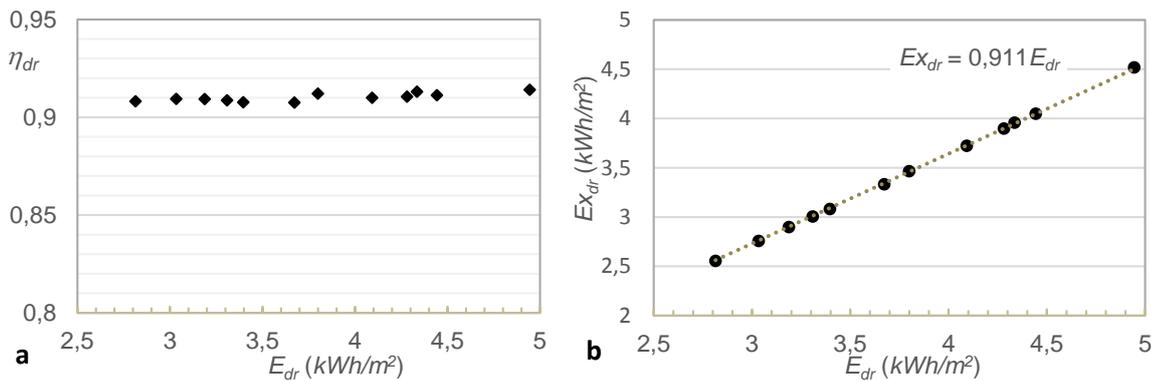
La radiación solar se caracteriza por su fuerte comportamiento transitorio, que no puede ser obviado y por ello lo más adecuado es realizar la integración de los flujos de radiación y de los flujos exergéticos que acompañan a la radiación solar sobre el período de tiempo desde la salida hasta la puesta del sol y así

obtener la energía radiante  $E$  y la exergía  $E_x$  transportada por la radiación a lo largo de dicho período, que es precisamente el tiempo aprovechado para la captación por los diferentes dispositivos solares cada día.

Luego, los factores de exergía de la radiación directa  $\eta_{dr} = E_{xdr} / E_{dr}$ , de la radiación difusa  $\eta_{df} = E_{xdf} / E_{df}$  y de la radiación solar  $\eta_{dr} = (E_{xdr} + E_{xdf}) / (E_{dr} + E_{df})$  serán definidos en términos de valores totales de las energías y exergías durante el período de insolación. Los valores que se muestran han sido integrados para los valores del día promedio de cada mes del año.

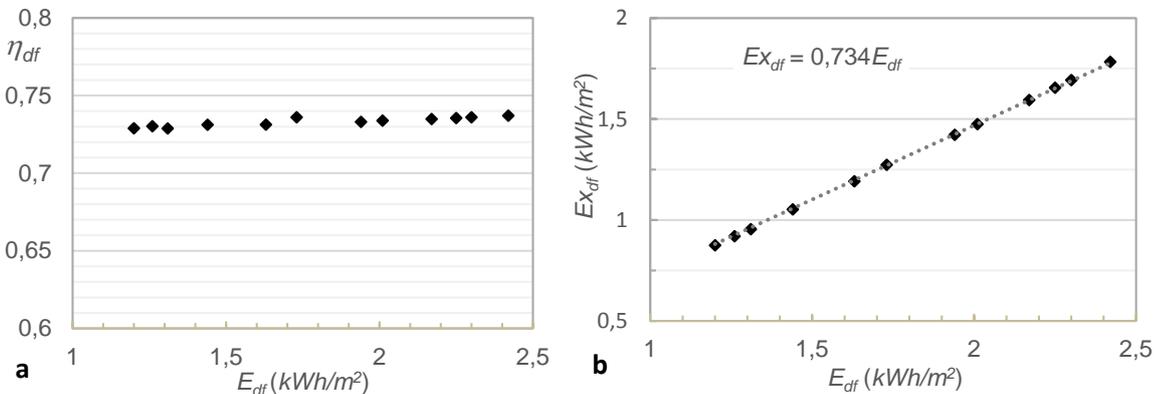
La figura 6.a, muestra el intervalo de variación del factor de exergía de la radiación directa  $\eta_{dr}$  durante el año en función de la energía de la radiación solar directa. En la figura 6.a, se aprecia que  $\eta_{dr}$  varía muy poco de un mes a otro, entre 0,908 y 0,914. Este resultado indica que la exergía de la radiación solar directa mantiene una relación de proporcionalidad con la energía de la radiación solar directa, siendo afectada apenas por la temperatura ambiente  $T_o$  cuyo valor promedio varía de un mes a otro.

En la figura 6.b, se muestra el comportamiento de la exergía de la radiación directa versus la energía de la radiación directa. El ajuste de los valores permite visualizar el comportamiento lineal entre ambas magnitudes, ofreciendo el mejor valor para el factor de exergía de la radiación directa siendo  $\eta_{dr}=0,911$ . La figura 7.a, muestra el intervalo de variación del factor de exergía de la radiación solar difusa, resultando  $0,729 < \eta_{df} < 0,737$ . La radiación difusa mantiene un contenido exergético durante todos los meses del año bastante estable como muestra la gráfica.



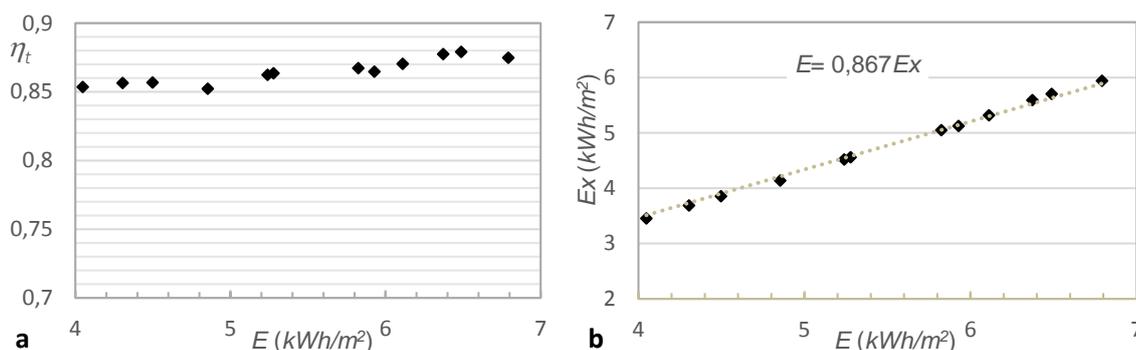
**Fig. 6. a) Factor de exergía de la radiación solar directa.**  
**b) Exergía de la radiación directa versus la energía de la radiación solar directa.**

Por otro lado, la figura 7.b, muestra como la exergía de la radiación difusa se comporta de manera proporcional a la radiación difusa permitiendo mediante ajuste determinar el mejor valor para el factor de exergía que resulta ser de  $\eta_{df}=0,734$ . El valor absoluto del factor de exergía obtenido para la radiación difusa es ~20% menor que el factor de exergía de la radiación directa, la explicación es obvia, la entropía asociada a la radiación difusa es mucho mayor que la asociada a la radiación directa.



**Fig. 7. a) Factor de exergía de la radiación solar difusa.**  
**b) Exergía de la radiación difusa versus la energía de la radiación solar difusa.**

El comportamiento del factor de exergía de la radiación solar total  $\eta$  se muestra en la figura 8.a, observándose que dicho factor varía en el intervalo de 0,853-0,879. Las variaciones en los valores de  $\eta$  son debidas esencialmente a la variación de la razón entre la energía solar difusa y la energía solar directa que componen la radiación solar total. En la figura 8.b, igual que antes se ofrece el comportamiento de la exergía total de la radiación solar versus la energía de la propia radiación observándose, de nuevo, proporcionalidad entre ambas. Sin embargo, lo más importante resulta que el valor obtenido por ajuste para el mejor valor del factor de exergía total es, nuevamente,  $\eta=0,867$ , el mismo obtenido cuando se realizó el análisis a partir de los flujos de energía y exergía, lo que permite validar que el tratamiento de los datos ha sido adecuado.



**Fig. 8. a) Factor de exergía de la radiación solar total.  
b) Exergía de la radiación solar versus la energía de la radiación solar.**

## CONCLUSIONES

Con este trabajo se logró cumplir el objetivo propuesto de realizar una evaluación de la exergía de la radiación solar. El valor de la exergía obtenida representa el máximo trabajo posible a obtener y debe ser independiente de las características de la superficie del dispositivo empleado. Para este trabajo se tomó una superficie ideal la cual absorbe toda la radiación solar y no emite nada. Aplicando el modelo de análisis propuesto por Pons, se procesaron los datos de radiación real para una localización elegida, diferenciando entre la radiación difusa y la radiación directa.

1. Se obtuvo el mejor valor del factor de exergía de la radiación solar, a través del análisis de los flujos de energía instantáneos y a través del análisis energético integrado, para la región seleccionada, siendo  $\eta=0,867$ , el cual puede ser aplicado para cualquier día del año.
2. Se determinó el factor de exergía de la radiación solar diferenciado para horarios de bajo flujo de radiación  $\dot{e} < 0,4 \text{ kW} / \text{m}^2$  siendo  $\eta=0,808$  y para horarios de flujos de radiación  $\dot{e} > 0,5 \text{ kW} / \text{m}^2$  siendo  $\eta=0,875$ .
3. Se obtuvo también el factor de exergía correspondiente a la radiación directa  $\eta_{dr}=0,911$  y a la radiación difusa  $\eta_{df}=0,734$  como componentes de la radiación solar.

## REFERENCIAS

- [1]. OZTOP, H. F., et al. "Energetic and exergetic aspects of solar air heating (solar collector) systems". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 21. pp. 59-83. ISSN: 1364-0321. Disponible en web: <http://www.sciencedirect.com/science/>. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.019>.
- [2]. GE, Z., et al. "Exergy analysis of flat plate solar". *Collectors Entropy*. 2014. Vol. 16. No. 5. pp. 2549-2567.
- [3]. JAFARKAZEMI, F.; AHMADIFARD, E. "Energetic and Exergetic Evaluation of Flat Plate Solar Collectors". *Renewable Energy*. 2013. Vol. 56. No. doi: 10.1016/j.renene.2012.10.031. pp. 55-63.
- [4]. KALOGIROU, S. A., et al. "Exergy analysis on solar thermal systems: a better understanding of their sustainability". *Renewable Energy*. 2016. Vol. 85. pp. 1328-1333. ISSN: 0960-1481.
- [5]. CHAMOLI, S. "Exergy analysis of a flat plate solar collector". *Journal of Energy in Southern Africa*. 2013. Vol. 24. No. 3. pp. 08-13. ISSN: 1021-447X.
- [6]. PETELA, R. "Exergy of heat radiation". *Journal of Heat Transfer*. 1964. Vol. 86. No. 2. pp. 187-192. ISSN: 0022-1481.

- [7]. JETER, S. M. "Maximum conversion efficiency for the utilization of direct solar radiation". *Solar energy*. 1981. Vol. 26. No. 3. pp. 231-236. ISSN: 0038-092X.
- [8]. SPANNER, D. C. Introduction to thermodynamics. Introduction to thermodynamics. Academic Press: London and New York, 1964.
- [9]. ZAMFIRESCU, C.; DINCER, I. "How much exergy one can obtain from incident solar radiation?". *Journal of Applied Physics*. 2009. Vol. 105. No. 4. pp. 044911/044911-044915. ISSN: 0021-8979.
- [10]. [28]. PONS, M. "Exergy analysis of solar collectors, from incident radiation to dissipation". *Renewable Energy*. 2012. Vol. 47. pp. 194-202. ISSN: 0960-1481.
- [11]. NERI, M., et al. "Computing the exergy of solar radiation from real radiation data on the italian area". En: 12th joint European thermodynamics conference. Brescia, Italy: 1-5/7, 2013. pp. 451-457.
- [12]. GONZÁLEZ B, J. J.; PITA C., L. "Exergía de la radiación solar. Evaluación para la radiación real en la Habana". En: VIII Congreso Internacional de Energías Renovables, CIER. Habana, Cuba: 25-28/5/2015, 2015.
- [13]. ATMOSPHERIC SCIENCE DATA CENTER. "Nasa Surface Meteorology and Solar Energy". [Citado: noviembre de 2014]. Disponible en web: <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>.

#### AUTOR

##### **Juan José González Bayón**

Ingeniero Eléctrico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Estudios de Tecnologías Energéticas Renovables, CETER. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, CUJAE, La Habana, Cuba.

e-mail: [jjgbayon@ceter.cujae.edu.cu](mailto:jjgbayon@ceter.cujae.edu.cu)

##### **Lenin Pita Cantos**

Ingeniero Mecánico, Profesor Titular, Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Técnica de Manabí, Manabí, Ecuador.

e-mail: [lpita@utm.edu.ec](mailto:lpita@utm.edu.ec)

##### **Rubén Borrajo Pérez**

Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Estudios de Tecnologías Energéticas Renovables, CETER. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, CUJAE, La Habana, Cuba.

e-mail: [rborrajo@ceter.cujae.edu.cu](mailto:rborrajo@ceter.cujae.edu.cu)