**III CONFERENCIA INTERNACIONAL DE DESARROLLO ENERGÉTICO SOSTENIBLE**

**CIDES 2023**

**Algunas opciones para elevar la eficiencia del uso final de la energía solar fotovoltaica**

***Some alternatives for rising end-use efficiency of photovoltaic solar energy***

**Pablo R. Roque Díaz1, Manuel A. Rubio Rodríguez2**

1. Pablo R. Roque Diaz. Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales (CEETA). Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV) Cuba. E-mail: proque@uclv.edu.cu

2- Manuel A. Rubio Rodríguez. Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales (CEETA). Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV) Cuba. E-mail: manuelrr@uclv.edu.cu

**Resumen:** El sistema eléctrico nacional (SEN) muestra signos de agotamiento de su vida útil, lo que hace necesario buscar soluciones sostenibles a largo plazo para su reconstrucción y modernización. La vía principal es la progresiva penetración de fuentes renovables con la consecuente disminución de la fracción de energía fósil, actualmente mayoritaria y la elevación de la eficiencia del uso final de la energía. La energía solar fotovoltaica resulta una alternativa competitiva a pesar de su carácter intermitente que hace imprescindibles el uso de medios de acumulación, que elevan apreciablemente los costos. Resultan muy flexibles los sistemas centralizados de refrigeración y bombas de calor conformando esquemas híbridos de suministro de servicios energéticos en escenarios con altas demandas de refrigeración y calefacción que permiten multiplicar los flujos energéticos disponibles según sus coeficientes de desempeño (COP), generalmente superiores a la unidad, disminuyendo la relación costo-beneficio. Estos sistemas permiten acumular energía almacenando fluidos térmicos, que en ciertas aplicaciones pueden resultar más flexibles, económicos y menos contaminantes que las baterías electroquímicas. Se proponen en este trabajo algunas alternativas poco utilizadas que pueden resultar en incrementos de la eficiencia global de utilización de tecnologías fotovoltaicas.

**Palabras clave:** Bomba de calor; Sistema de refrigeración en cascada; Evaporación instantánea; Análisis termoeconómico; Costo exergético.

***Abstract:*** *The national electric system (SEN) shows to be approaching the end of its life cycle. This makes it necessary to look for long term sustainable alternatives for its refurbishing and updating. One of the main ways for that is the progressive penetration of renewable sources among with the consequent diminishing of the fossil ones, majority nowadays and also the rise of energy end use efficiency. Photovoltaic solar energy is a competitive alternative in spite of its intermittency, which makes mandatory the need of energy accumulation and hence raises the investment costs. Heat-pumping technologies, used both for centralized cooling and/or heating, driven by PV power sources may conform very flexible hybrid energy supply schemes in scenarios with high and comparable demands of heating, cooling and power. The coefficients of performance (COP) of heat pumping devices being often higher than unit allow appreciable rising of available energy flows and hence energy end-use efficiency. These systems allow energy storage as thermal fluids that can be more flexible, more economic and less polluting than the electrochemical batteries in certain applications. In this work some less used alternatives that can result in increments of the global efficiency of photovoltaic technologies in certain scenarios are presented.*

 *Keywords: Heat pump; Cascade refrigeration systems; Flash steam generation; Thermoeconomic analysis; Exergy cost.*

**1. Introducción**

El sistema eléctrico nacional (SEN) cubano tiene en su estructura actual cerca de medio siglo de explotación y presenta signos inequívocos de deterioro y obsolescencia lo que unido al crecimiento sostenido de las demandas hacen imprescindible y urgente una política coherente de sustitución de gran parte del equipamiento y su actualización tecnológica. Adicionalmente, la matriz energética nacional, por razones históricas es mayoritariamente satisfecha por energías fósiles esencialmente derivados del petróleo. Un conjunto de decisiones políticas ha sido tomado y apunta a dar el máximo de prioridad a las fuentes renovables de energía (FRE), en un período gradual de transición hacia la satisfacción del 30 % de las necesidades de energía para el año 2030, mientras se va disminuyendo progresivamente la dependencia de los combustibles fósiles [1]. Esta transición debe ir acompañada de un conjunto de medidas encaminadas al uso racional de los recursos energéticos del lado de las demandas para obtener a través del incremento de la eficiencia una disminución de la relación costo/beneficio.

A largo plazo es posible prever mayores relaciones de penetración, que sin embargo en el corto y mediano horizontes deberán coexistir complementándose entre sí teniendo en cuenta los profundos cambios necesarios tanto en la infraestructura de gestión energética, como en las maneras de actuar y de implementar los profundos cambios implicados. Teniendo en cuenta solamente estos últimos aspectos, el incremento de la utilización de la energía biomásica es la vía que más se adaptaría a los cambios referidos por ser más cercana tecnológicamente a la tecnología actual. Tiene, sin embargo, algunas características que la hacen poco atractiva para un proceso que debiera ser rápido: los tiempos prolongados requeridos para el montaje y puesta en explotación y los complicados sistemas logísticos y de gestión requeridos para su explotación fiable y efectiva.

La energía solar, origen de muchas otras fuentes renovables, usada directamente resulta en un conjunto de alternativas que gozan en nuestra área climática de abundancia del portador energético primario, que se acerca a una irradiancia cercana a 1 kW/m2 en gran parte del territorio nacional y con variaciones pequeñas a lo largo del año [2]. Tienen, sin embargo, la limitación de la intermitencia diaria, la estacionalidad y dependencia de la nubosidad, características que deben ser tenidas en cuenta al conformar los sistemas de abastecimiento energético y que implican la necesidad de utilizar sistemas de acumulación de diferentes tipos o hibridación de tecnologías que elevan los costos globales del proyecto. En la actualidad los sistemas basados en la energía solar térmica utilizan acumuladores de fluidos térmicos (principalmente agua o vapor), mientras que los que obtienen potencia eléctrica, que resultan mucho más flexibles en su interacción con los sistemas de distribución y los dispositivos de uso final tradicionales, utilizan típicamente la opción de acumulación de energía eléctrica en baterías electroquímicas de diferentes tipos, o la generación y almacenamiento de hidrógeno gaseoso.

La tecnología fotovoltaica, que convierte directamente la energía de la radiación solar en potencia eléctrica posee muchas cualidades que le dan flexibilidad y en los últimos años ha venido disminuyendo sus costos específicos de manera que en la actualidad resulta en ese aspecto competitiva en ciertos escenarios en relación con las fuentes fósiles y también con otras FRE [5]. Adicionalmente posee en general muy pequeños costos específicos de mantenimiento y un montaje comparativamente rápido, y su carácter modular permite acometer progresivamente instalaciones ejecutables por etapas, aspectos estos que pueden resultar decisivos en algunos proyectos y que resultan determinantes cuando se necesita realizar profundos cambios en corto tiempo. Así mismo, el hecho de que la electricidad generada puede, con ciertas modificaciones comparativamente simples, usarse directamente por los consumidores o intercambiarse flexiblemente con otros usuarios y con empresas suministradoras del servicio eléctrico tradicional [3].

**2. Hibridación de refrigeradores y bombas de calor fotovoltaicos.**

La utilización de tecnologías fotovoltaicas permite saltar los pasos de transformación generalmente requeridos para la obtención de potencia eléctrica lo que permite, en líneas generales, simplificar los esquemas en comparación con los tradicionales que necesitan ciclos termodinámicos sujetos a la eficiencia de Carnot que resultan satisfactorios cuando, como es frecuentemente el caso, la instalación usuaria tiene requerimientos también de corrientes de calentamiento y refrigeración, en particular satisfechos con esquemas de poligeneración.

Los sistemas de bombeo de calor se utilizan ampliamente para trasladar energía térmica de bajas a altas temperaturas, en contra de la tendencia natural. Son bien conocidas las aplicaciones de refrigeración, donde el beneficio consiste en mantener baja la temperatura de un local en un ambiente más caliente y los de calefacción, donde se requiere mantener caliente un local en ambientes más fríos. Ambas aplicaciones son teóricamente equivalentes y solo difieren en el objetivo a conseguir siendo frecuente el diseño transformable utilizado en lugares donde a lo largo del año alternan condiciones que requieren refrigeración o calefacción. En el presente texto, se utilizarán los términos bomba de calor y bombeo de calor referidos indistintamente a dispositivos y operaciones con fines tanto de refrigeración como de calefacción.

Es costumbre generalizada evaluar el desempeño de las bombas de calor mediante el coeficiente de desempeño (COP: “coefficient of performance”) que expresa la razón del servicio requerido a la energía necesaria para obtenerlo, típicamente una potencia eléctrica suministrada externamente. Los valores del COP para ambas aplicaciones de refrigeración y calefacción se definen según:

$COP\_{ref }$*=* $\frac{Q\_{ref}^{.}}{W\_{eléct}^{.}}$ y $COP\_{cal }$*=* $\frac{Q\_{cal}^{.}}{W\_{eléct}^{.}}$

donde $Q\_{ref}^{.}$ y$ Q\_{cal}^{.}$ son las tasas de transferencia de calor de refrigeración y calefacción, y $W\_{elécr }^{.}$la potencia eléctrica consumida para el bombeo de calor.

Es frecuente encontrar actividades productivas y de servicios donde las necesidades energéticas se puedan satisfacer mediante dispositivos de bombeo de calor, lo que puede significar una multiplicación de los flujos energéticos disponibles para refrigeración y/o calefacción teniendo en cuenta que los valores del COP en instalaciones típicas son frecuentemente mayores que la unidad, en tanto que los de calefacción siempre lo son. Esto eleva de 3 a 5 veces la potencia eléctrica consumida, según las condiciones concretas.

Por otro lado, la utilización de fluidos intermedios en sistemas centralizados de climatización por refrigeración o calefacción permite la acumulación de cantidades importantes de energía térmica en capacidades de almacenamiento del fluido intermedio y, en caso de accionar la bomba de calor mediante energía solar fotovoltaica, permitiría aprovechar las horas y días de alta insolación para almacenar el fluido térmico (frío o caliente según el caso) que puede ser bombeado y realizar su función en períodos nocturnos o nublados. Es probable que en ciertos escenarios tales sistemas de acumulación de energía térmica sean más ventajosos que los basados en baterías electroquímicas.

En algunas instalaciones ya existen sistemas centralizados de climatización por lo que la transición a la tecnología fotovoltaica resulta muy flexible pues fundamentalmente requiere de la construcción o ampliación según necesidades de las capacidades de almacenamiento de fluido térmico frío o caliente. Tal es el caso de algunas instalaciones hospitalarias, comerciales, aeroportuarias, plantas textiles, de producción de medicamentos y otras. En general, una instalación que ya trabaje con un sistema de climatización centralizado será muy flexible en cuanto a la transición progresiva hacia la climatización fotovoltaica pues se podrá ir sustituyendo paulatinamente la potencia eléctrica de origen fósil por la renovable [4, 6].

1. **Sistemas de acumulación de energía térmica**

En dependencia de la utilización prevista para la energía térmica (refrigeración o calefacción), se podrá utilizar como fluido intermedio y a la vez vehículo de acumulación el agua enfriada o calentada sea atmosférica o presurizada, el vapor, aceite y otros fluidos con características particulares, y los rellenos sólidos masivos, con aire u otros gases como fluido de transporte. Los acumuladores de agua atmosférica son los más simples y aunque está limitados a temperaturas entre 6 °C y 90 °C, una gran parte de las aplicaciones pueden ser satisfechas con ese intervalo. La capacidad teórica de almacenamiento de energía interna con agua atmosférica es de 4,18 MJ/m3 por cada grado de diferencia entre las temperaturas de almacenamiento y de utilización.

A manera de ejemplo: una cisterna de 100 m3 llena de agua a 6 °C para utilizarla hasta 12 °C almacena unos 2,5 GJ equivalentes a unas 200 TR-h ([[1]](#footnote-0)) de climatización. En caso de desear recargar esa energía en 8 horas de sol se requerirían unos 90 kW de potencia media o 225 kWpico o unos 1350 m2 de paneles fotovoltaicos. Esa cantidad de energía almacenada podría satisfacer una demanda de climatización media de 100 TR durante 20 horas sin sol antes de tener que recargar nuevamente la cisterna.

Las principales exigencias al diseño y operación de sistemas de acumulación de energía térmica tienen que ver con la capacidad (volumen) para satisfacer las necesidades nocturnas y de períodos de alta nubosidad y el aislamiento térmico óptimo para disminuir las pérdidas o ganancias de calor, según el caso, a través de sus paredes [2, 3].

1. **Requerimientos de calefacción.**

Aunque se piensa en calefacción como las necesidades de climatización en lugares de baja temperatura ambiental y por ello se excluye con frecuencia del análisis las necesidades de calefacción en países de clima cálido, es un hecho que en todas las condiciones se necesita consumir importantes cantidades de portadores energéticos para calentar lugares o procesos que requieren una mayor temperatura que la ambiental. Típicamente se recurre a la combustión directa de combustibles para tal fin en hornos, hogares, generadores de vapor y calentadores de otros fluidos térmicos. También es frecuente el uso directo de potencia eléctrica en diversas aplicaciones.

Cuando el análisis de las demandas energéticas arroja importantes fracciones para la calefacción, el uso de bombas de calor resulta una opción atractiva en muchos escenarios ya que los flujos de energía para calentamiento resultan mayores que la energía eléctrica demandada por un factor equivalente el valor del $COP\_{cal }$. Esta alternativa, es aplicable a cualquier esquema de suministro de la potencia eléctrica, pero es en el caso de utilización de la energía fotovoltaica una forma muy eficiente de multiplicar la capacidad del parque solar cuando una o la más importante partida de las demandas lo es la de calefacción. Incluso siendo la única demanda energética, en ciertos escenarios la opción EFV + BC puede ser más eficiente y barata que la de uso directo de los captadores de energía solar térmica.

Para este esquema es posible extraer el calor mediante el bombeo de un depósito a temperatura ambiente, pero si existiera algún depósito o corriente disponible a alguna temperatura superior, debido, por ejemplo, a la existencia de corrientes de energía de desecho, el desempeño de la instalación puede elevar su eficiencia por elevación del $COP\_{cal }$ por disminución de la diferencia de temperaturas, lo que implicaría un mejor aprovechamiento de la potencia de bombeo de calor. También se podrá obtener un flujo de calefacción de mayor exergía, por mayor temperatura del proceso de condensación de la bomba de calor ya que esta temperatura generalmente está limitada por la relación de presiones del compresor.

Cuando las necesidades de calefacción exigen el uso de vapor a temperaturas moderadas, situación bastante frecuente (T ≤ 180 °C; P ≤ 10 bar) la bomba de calor puede consistir apenas en un proceso de compresión del vapor emitido por agua previamente calentada en fase líquida provocando su evaporación mediante la evacuación con el propio compresor. Esto apunta a la conveniencia de utilizar sistemas de cascada para conseguir con varios saltos térmicos y de presión moderados entre la temperatura ambiente y la deseada en la calefacción el efecto buscado.

Esta cascada puede también incluir etapas iniciales de refrigeración o climatización, con lo cual se excluiría en estas la necesidad de torres de enfriamiento y el calor expulsado por los sistemas de refrigeración sería la energía de entrada de las bombas de calor de calefacción. Estos sistemas en cascada permiten elevar la flexibilidad del sistema con salidas de servicios a diferentes temperaturas y posibilidades de optimizar la gestión del conjunto a partir de la dinámica temporal de las demandas. Las técnicas de optimización termoeconómica permiten tomar decisiones de planificación y en tiempo real sobre la distribución de los servicios energéticos disponibles. Teóricamente estos sistemas pueden llegar a convertirse en economía energética circular con desechos nulos.

1. **Esquemas de logística energética híbrida fotovoltaica con bombeo de calor (FV+BC).**
	1. **Esquema simple: accionamiento fotovoltaico de bomba de calor con acumulación de fluido térmico.**

Este esquema se compone de un parque fotovoltaico con o sin interconexión con el suministrador de electricidad, accionando un conjunto de máquinas de refrigeración que enfrían un fluido térmico que es almacenado propiciando su utilización en momentos de baja o inexistente irradiancia. En casos en que el uso único del servicio de refrigeración sea para obtener climatización, el fluido térmico preferido es el agua pues se puede utilizar para enfriar el aire a temperaturas moderadas. En caso de que se requieran temperaturas inferiores podrá considerarse la utilización como vehículo intermedio de fluidos con puntos de congelación inferiores a 0 °C. El sistema de bombeo del fluido debe permitir la posibilidad de utilizar el que proviene del sistema de refrigeración solar o el del almacenamiento.

El accionamiento de los dispositivos de almacenamiento puede ser utilizando la corriente directa generada en el PSF, pero más frecuentemente puede ser conveniente considerar la alternativa de utilizar inversores y convertirla en alterna de frecuencia fija o variable, lo que daría la posibilidad de alimentación del sistema indistintamente con la red comercial o con el circuito fotovoltaico [8].

En este esquema, aunque puede existir un sistema de acumulación de energía eléctrica, como baterías, volantes o acumuladores de energía potencial, el medio principal de garantía de la estabilidad, sería la acumulación de frío.

Este esquema es aplicable en diversas situaciones donde la climatización y/o calefacción centralizada es la única o principal demanda de energía eléctrica, y por su flexibilidad puede permitir un elevado índice de sustitución de electricidad fósil.



Figura 1 (a) Figura 1 (b)

Figura 1. Esquema simple: accionamiento fotovoltaico (a) para climatización con acumulación de agua fría y (b) para calefacción con acumulación de agua caliente. Fuente: Elaboración propia.

* 1. **Esquema en cascada: accionamiento fotovoltaico con bombeo de calor en varias etapas con acumulación de varios fluidos térmicos.**

En los sistemas en cascada se interconectan en serie un conjunto de ciclos de bombeo de calor en los que los de temperaturas inferiores bombean energía térmica a los de temperaturas más altas. Un ejemplo sencillo puede consistir en un equipo de refrigeración y/o climatización extrayendo calor de un local refrigerado y expulsando calor al evaporador de una bomba de calor, cuyo condensador calienta el local o proceso de interés. El sistema en cascada recibe potencia por ambos compresores, realiza refrigeración por la zona de baja temperatura y calefacción por la de alta, sin expulsar ni extraer calor alguno del ambiente [6].

Siendo este un dispositivo con dos productos o servicios energéticos, su coeficiente de desempeño debe incluir en el numerador ambos efectos, el refrigerante y el calefactor y en el denominador la potencia total consumida en ambos compresores:

$$COP\_{ref cal cascada}= \frac{Q\_{ref}^{∙}+Q\_{cal}^{∙}}{W\_{ref}^{∙}+W\_{cal}^{∙}}$$

El valor máximo de este coeficiente, de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica corresponde al caso teórico en que ambos dispositivos termodinámicos son reversibles, como por ejemplo una máquina térmica de Carnot y un refrigerador de Carnot. En este caso el valor máximo puede ser calculado mediante las temperaturas termodinámicas de la cámara fría, la cámara caliente y el ambiente (TL, TH y T0). Se puede juzgar, sin embargo, que la temperatura del ambiente es en este caso irrelevante, no así en las bombas de calor reales pues existe irreversibilidad en el condensador –evaporador.

$$COP\_{ref cal máximo}= \frac{T\_{H}^{}+T\_{L}^{}}{T\_{H}^{}−T\_{L}^{}}$$



Figura 2. Cascada de un sistema de refrigeración con una bomba de calor para calefacción. Fuente: Elaboración propia.

* 1. **Esquema con generación de vapor.**

El esquema con acumulación de fluido térmico puede ser monofásico, como por ejemplo la acumulación de agua, aceite térmico o algún otro líquido o bifásico, cuando se utilizan acumuladores de vapor de agua, que generalmente incluye la fase líquida en equilibrio con el vapor dada la alta capacidad de acumulación de energía que puede ser liberada durante la evaporación, sin variación de la temperatura. Cuando se requiere el vapor como portador energético para el proceso generalmente este se genera a partir de agua caliente a una temperatura cercana a su punto de ebullición. Esto, por lo general se consigue con una cascada de bombas de calor cuya primera etapa permite la obtención de agua caliente y luego una segunda etapa consistente en un compresor en función de bomba de vacío que reduce la presión en la superficie del agua caliente con lo que se propicia la evaporación a una temperatura inferior a 100 °C, y luego la compresión de los vapores hasta la temperatura y presión requerida con una relación de presiones moderada en el compresor.

* 1. **Compresión de vapor fotovoltaica.**

La compresión de vapor de baja presión considerada como un proceso de obtención de un portador energético de mayor temperatura es en realidad un tipo de bombeo de calor en que se prescinde de los procesos de transferencia de calor asociados a los ciclos termodinámicos cerrados, y por tanto, menos afectados por las irreversibilidades externas, además de considerablemente más simples desde el punto de vista estructural. Estos factores contribuyen a disminuir los costos iniciales de una instalación de este género en comparación con un ciclo cerrado de compresión de vapor. Por otro lado, el sistema de compresión de vapor deberá tener en cuenta la variación de la presión de saturación con la temperatura del vapor a obtener, que puede elevar considerablemente la relación de presiones, y hacer necesaria la compresión multietapas, una variante del bombeo de calor en cascada. En cualquier caso, el rendimiento efectivo de la potencia fotovoltaica convertida de ese modo en un servicio de calefacción, resulta una alternativa atractiva en los sistemas en que esta es la partida única o predominante en la demanda energética [9].

.

 

Figura 3. Bomba de calor de generación de vapor por compresión de evaporación al vacío. Fuente: Elaboración propia

* 1. **Caldera eléctrica**

El uso de la energía fotovoltaica para generar vapor mediante resistencias u otros modos de calentamiento eléctrico no es justificable en general desde el punto de vista termodinámico frente al bombeo de calor ya descrito. Sin embargo, por su simplicidad puede ser una opción válida a aplicar en la satisfacción de necesidades de vapor de pequeña escala, coyunturales o intermitentes o como medio de utilizar excedentes de potencia de una forma directa durante la explotación de una instalación fotovoltaica.

1. **Resultados y discusión. Comparación termoeconómica de los sistemas híbridos FV + BC con la cogeneración - trigeneración.**

Los sistemas de abastecimiento energético de procesos e instalaciones mediante esquemas de cogeneración o producción combinada de potencia y calor (CHP) y su ampliación a la producción de frío (trigeneración o CCHP) se han extendido como una forma más eficiente de abastecer de servicios energéticos a procesos o instalaciones a partir de una única fuente primaria, típicamente un combustible tecnológico. En comparación con el suministro separado de potencia y calor, estos esquemas muestran una disminución considerable del consumo unitario de energía primaria, o costo exergético unitario [7]. Cuando se consideran los costos adicionales no exergéticos o costo exergoeconómico unitario, la complejidad de la instalación, puede resultar en una disminución de la rentabilidad real respecto a otras alternativas. El impacto ambiental respecto al suministro separado también resulta inferior, por el menor consumo de combustible que es generalmente fósil.

En cuanto a las instalaciones FV+BC debido a la comparativamente baja eficiencia de conversión de los materiales disponibles comercialmente en la actualidad (del orden del 20 %), pueden resultar inferiores en el costo exergético unitario lo que resulta compensado con creces en la amplia disponibilidad de la energía primaria solar que de hecho resulta esencialmente una fuente gratuita de energía, aunque en su explotación se incurra en costos no exergéticos, tales como el uso de la superficie de suelo y el propio costo de las instalaciones tecnológicas. En la actualidad el costo unitario de instalación de un parque solar fotovoltaico es del orden de los 1200 USD/kWpico instalado que resulta competitivo y en ocasiones ventajoso por encima de los sistemas CHP y CCHP. Adicionalmente, se requiere en ellos de una fuente estable de suministro de combustible, que ha sido impulsor de dichos sistemas en países y regiones con alta disponibilidad de gas natural. En Cuba, la primera opción en la mayoría de los proyectos es la utilización de fuel oil y otros combustibles derivados del petróleo de difícil manipulación y de altos indicadores de impactos ambientales de diferentes tipos. Es obvio que ninguno de esos problemas está presente en la opción FV+BC.

Por último, pero no menos importante, la simplicidad del montaje y los reducidos costos de mantenimiento de las instalaciones fotovoltaicas pueden contribuir decisivamente en la disminución de los costos de operación y de los plazos de puesta en marcha de las instalaciones de este tipo.

Estos aspectos tienen que ser precisados en cada proyecto concreto, pero apuntan a un conjunto de posibilidades reales que caracterizan estas alternativas, que si bien son conocidas desde hace mucho tiempo, no han sido sin embargo utilizadas.

1. **Conclusiones**

1. La radiación solar constituye la más extensa y abundante fuente de energía primaria, cuya generalización para la satisfacción de necesidades energéticas de la humanidad es no solamente una posibilidad de elevar la sostenibilidad de los procesos productivos y el bienestar humano, sino la más conveniente en el largo plazo.

2. La conversión fotovoltaica de radiación solar en potencia eléctrica se ha hecho mucho más competitiva en los últimos años, lo que unido a su simplicidad y bajos costos de operación y mantenimiento y a la facilidad de su montaje y posibilidades de adaptarse a los proyectos modulares y de ejecución escalonada permiten imponerse en muchos escenarios de reconversión energética.

3. La combinación de la técnica fotovoltaica con el bombeo de calor en su acepción más general (incluyendo las aplicaciones de refrigeración y climatización) conforma todo un conjunto de potencialidades de satisfacer necesidades de servicios energéticos obtenidos del uso de la potencia eléctrica y de la energía térmica, que constituyen la inmensa mayoría de las variantes de logística energética.

4. Esta posibilidad se complementa por la característica de tener una alta eficiencia global de conversión, de ser totalmente renovable, y de adaptarse a la aspiración de obtener un sistema de cero residuos o economía circular.

1. **Referencias bibliográficas**
2. Ministerio de Economía y Planificación. MEP Cuba. PNDES 2030. Plan nacional de desarrollo económico y social hasta el 2030. <https://www.mep.gob.cu>
3. Jesús Gabriel García Tamayo y Francisco Beraldo Herrera Fernández. Modelado de un parque solar fotovoltaico de empleo industrial. Ingeniería Energética. 2023. 44(1), enero/abril. ISSN: 1815-5901. <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>
4. Dincer, Ibrahim. Thermal energy storage : systems and applications / Ibrahim Dincer, Marc A. Rosen. – 2nd ed. Rev. ed. of: Thermal energy storage systems and applications / [edited by] Ibrahim Dincer, and Marc Rosen. c2002. ISBN 978-0-470-74706-3
5. Abdelkader Gourbi, Mohamed Miloudi and Houcine Miloudi. An investigation and analysis of a hybrid photovoltaic system for power supply. Ingeniería Energética. 2022. 43(3), septiembre/diciembre. ISSN: 1815-5901. <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>.
6. Javier Valladares Aguilera, et al. Análisis de la influencia del azimut y ángulo de inclinación en centrales fotovoltaicas de Cuba. Ingeniería Energética. 2023. 44(1), enero/abril. ISSN: 1815-5901. <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>
7. Çengel Y., Boles M. Termodinámica. Octava edición en español. McGraw Hill. México 2015. ISBN 978-607-15-1281-9
8. Juan José González Bayón, Lenin Pita Cantos, Rubén Borrajo Pérez. Evaluación de la exergía de la radiación solar utilizando datos reales. Ingeniería Energética. Vol. XXXVII. No. 2, 2016. pp. 105-114, Mayo/Agosto, ISSN 1815-5901 <https://www.researchgate.net/publication/317515576>
9. Yandi Gallego Landera, Lesyani León Viltre, Grettel Quintana de Basterra, David Lara León. Revisión de los controladores de corriente para condiciones lvrt en un sistema fotovoltaico conectado a la red. Ingeniería Energética, 2022, 43(2), mayo/agosto. ISSN:1815-5901. <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>
10. Javier Muñoz, Pablo Díaz. A virtual solar photovoltaic laboratory. IEEE EDUCON Education Engineering 2010 – The Future of Global Learning Engineering Education.
1. (1) TR: abreviatura de “tonelada estándar comercial de refrigeración”. 1 TR equivale a la tasa de extracción de calor a 1 tonelada corta (2000 lb) de agua líquida a 0 °C para convertirla en hielo a la misma temperatura en 24 h. 1 TR equivale a una tasa de 3,52 kW o 12 000 Btu/h. 1 TR-h equivale a la energía de 3,52 kW-h o 12 000 Btu extraída por refrigeración. [↑](#footnote-ref-0)