

Fecha de presentación: abril, 2015 Fecha de aceptación: junio, 2015 Fecha de publicación: agosto, 2015

ARTÍCULO 9

## SELECCIÓN DE UN COLECTOR SOLAR PARA AUMENTAR LA TEMPERATURA DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN AL GENERADOR DE VAPOR DE LA UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS

### THE SELECTION OF A SOLAR COLLECTOR TO INCREASE THE TEMPERATURE OF THE WATER SUPPLY TO THE STEAM GENERATOR AT THE UNIVERSITY OF CIENFUEGOS

Ing. Reinier Jiménez Borges<sup>1</sup>  
E-mail: [rjborges@ucf.edu.cu](mailto:rjborges@ucf.edu.cu)

Ing. José Alejandro Madrigal Monzón<sup>1</sup>  
E-mail: [jamadrigal@ucf.edu.cu](mailto:jamadrigal@ucf.edu.cu)

Dr. C. Juan José Cabello Eras<sup>1</sup>  
E-mail: [jcabello@ucf.edu.cu](mailto:jcabello@ucf.edu.cu)

<sup>1</sup>Centro de Estudio de Energía y Medio Ambiente (CEEMA). Universidad de Cienfuegos. Cuba.

#### ¿Cómo referenciar este artículo?

Jiménez Borges, R., Madrigal Monzón, J. A., & Cabello Eras, J. J. (2015). Selección de un colector solar para aumentar la temperatura del agua de alimentación al generador de vapor de la universidad de Cienfuegos. Revista Universidad y Sociedad [seriada en línea], 7 (3). pp. 64-71. Recuperado de <http://rus.ucf.edu.cu/>

#### RESUMEN

La generación de vapor está presente en nuestros días en gran parte de los procesos industriales, de ahí que la búsqueda por mejorar su eficiencia sea uno de los grandes problemas de estos tiempos. Se determinarán a partir de la metodología existente en la Literatura, la eficiencia del generador de vapor, así como un análisis de la factibilidad de la inversión. Los resultados obtenidos demostrarán que la utilización de estos sistemas complementando el sistema de generación de vapor, constituye una alternativa para reducir el consumo de combustible. Se resalta además, que la puesta en práctica de este proyecto requerirá de apoyo de las instituciones, debido a los altos costos que acarrea esta tecnología, pero necesaria desde un punto de vista de sostenibilidad ambiental.

#### Palabras clave:

Colector Solar, Generador, Temperatura, Vapor.

#### ABSTRACT

*The steam generation is present today in most of the industrial processes, hence the quest to improve their efficiency is one of the great problems of our time. Shall be determined from the existing methodology in Literature, efficiency of the steam generator, and an analysis of the feasibility of the investment. The results demonstrate that the use of these systems complementing the steam generating system, is an alternative to reduce fuel consumption. It also highlights that the implementation of this project will require support from the institutions, due to the high costs involved in this technology, but necessary from the point of view of environmental sustainability.*

#### Keywords:

*Solar collector, Generator, Temperature, Steam.*

## INTRODUCCIÓN

Entre los tipos de energía renovable la solar es muy prominente. Se aprovecha a través del uso de celdas fotovoltaicas y colectores para producir energía eléctrica y calefacción de agua respectivamente, en procesos industriales o en sistemas integrados de los domicilios. Uno de los factores más ventajosos en el uso de la energía renovable es su capacidad de tener un impacto muy ligero hacia el medio ambiente (Sumathy, 2013) (Ferekides, 2011). Los calentadores solares, por ejemplo no emiten los gases tóxicos y nocivos tales como CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> que perjudican el medio ambiente y la vida humana (Kropp, 2009). Por otra parte los sistemas de vapor tienen hoy en día un uso muy extenso en aplicaciones diversas, tales como generación de energía mecánica y eléctrica, como agente calefactor en servicios comerciales e industriales, y como materia prima en determinados procesos entre otros. Hoy en día las calderas constituyen un elemento esencial en el funcionamiento de prácticamente todas las empresas industriales al proporcionar la potencia o el calor necesario para el proceso, dependiendo sus resultados productivos y económicos en gran medida de la confiabilidad, seguridad y eficiencia con que operen las calderas (González & Nordelo, 2010). En la Universidad de Cienfuegos se cuenta con dos generadores de vapor del tipo pirotubular. La tubería de vapor proveniente de la sala de calderas de DN 32 (ø 1 1/4") y presión 6 kgf/cm<sup>2</sup>, pasa por la reductora existente para reducir la presión a 3 kgf/cm<sup>2</sup> y 0.45 kgf/cm<sup>2</sup> que es la necesaria para poder suministrarla a las marmitas las cuales son utilizadas para la cocción de los alimentos. Como parte de evaluar el empleo de colectores solares para poder incrementar la temperatura del agua de alimentación a estos generadores y la influencia que esto tiene para el ahorro de combustible de la propia Universidad es que surge la siguiente investigación.

## DESARROLLO

El generador de vapor, como su nombre lo indica, tiene la función de producir vapor para ser utilizado en la generación de energía mecánica, eléctrica y para la alimentación a equipos de proceso. Hoy en día este equipo es un elemento esencial en el funcionamiento de prácticamente todas las empresas industriales (González & Nordelo, 2010). Las empresas industriales necesitan energía para su funcionamiento, generalmente, en su forma primaria, el calor, o como electricidad. De ahí que siempre se requiera la presencia de generadores de vapor para producir el vapor que suministrará el calor o que generará la energía eléctrica. En el mundo moderno, la energía para usos industriales tiene varias fuentes: la energía química de las sustancias combustibles, la energía potencial del agua acumulada en embalses, la energía atómica, la energía solar, la energía de las mareas y otras. Pero, a pesar de existir diversas fuentes,

la mayor parte se obtiene a partir de la energía química liberada, en forma de calor, por los combustibles al quemarse estos en los hogares de los generadores de vapor; de aquí, que el correcto diseño de estos equipos, su óptima construcción y su eficiente operación, sean de gran importancia y singular interés, máxime si se tiene en cuenta que los recursos combustibles del mundo son limitados y su mala utilización, además de contribuir a su agotamiento, significa pérdidas económicas para cualquier nación (González & Nordelo 2010). El incremento de la eficiencia en el generador de vapor es una necesidad de los procesos energéticos, pues los mismos en la actualidad presentan valores muy bajos, baste decir que de la energía del combustible al degradarse y una parte perderse por ineficiencia en los generadores de vapor, las turbinas, los generadores eléctricos, las líneas de transmisión, los transformadores, los motores eléctricos y los equipos mecánicos, el hombre sólo puede convertir en trabajo útil entre un 12 y un 30 %, lo que significa que la mayor parte de ella se pierde.

El generador de vapor tiene la función de transferir al agua, la energía en forma de calor de los gases producto de la combustión de la sustancia combustible, para que esta se convierta en vapor. En dependencia del origen del movimiento del agua y la mezcla agua - vapor, los generadores de vapor se clasifican en dos grandes grupos:

1. Generadores de vapor de circulación natural.
2. Generadores de vapor de circulación forzada.

El captador solar es el elemento de la instalación cuya función es transformar en calor la energía de la radiación solar que recibe en su superficie, y transferirla a un fluido para su aprovechamiento posterior (Dziewa; Zhao, 2014; Avero, 1997). Existen diversos tipos de captadores solares que, dependiendo de su tecnología y la temperatura de salida del fluido, se pueden clasificar:

- Captadores para aplicaciones de baja temperatura (inferior a 100 0C).

Sin cerramiento o cubierta de vidrio, cuyo uso no cumple con las especificaciones del CTE), para las instalaciones destinadas exclusivamente a la producción de agua caliente sanitaria.

- Con cerramiento o cubierta de vidrio, del tipo:
  - Planos.
  - De vacío.
- Captadores para aplicaciones de media (entre 100 0C y 400 0C) y alta temperatura.
- Captadores cilindro-parabólicos (Mangal, 2010; Duff, 1996).

El apoyo al proceso de generación de vapor es económico únicamente cuando una parte significativa del vapor se usa en el proceso directamente (la red de vapor es un sistema abierto o parcialmente abierto). El calentamiento de la parte adicional del agua desmineralizada mediante energía solar es económicamente atractivo, debido a que tanto el retorno del condensado como el agua de alimentación se encuentran a elevadas temperaturas (Ferekides, 2011; Giorgi, 2012) (Figura 1).

En las redes de vapor parcialmente abiertas, el agua desmineralizada se mezcla normalmente con el condensado de retorno y tiene que ser venteadado antes de poder entrar a la caldera de vapor. Esta desgasificación se realiza normalmente de forma térmica (el agua de alimentación tiene que ser calentada hasta 90°C para liberar el gas) usando vapor de proceso de la caldera. Por tanto, es una buena solución precalentar el agua adicional descalcificada antes de mezclarla con el condensado y antes de ventear la mezcla. De este modo, se consume menos vapor para la desgasificación, y puesto que éste es compatible con diferentes procesos de la fábrica, el sistema solar puede cubrir una parte significativa de la demanda total de calor simplemente instalando un intercambiador de calor en el sistema existente.

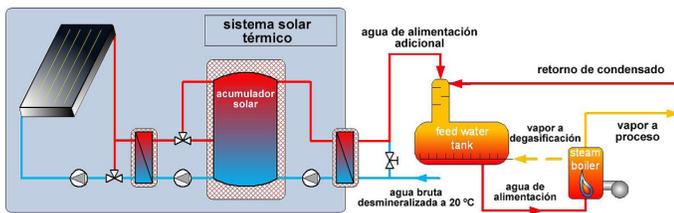


Figura 1. Concepto de sistema de intercambiador de agua bruta y caldera en serie.

El Balance Térmico de un generador de vapor posibilita determinar la eficiencia térmica, la capacidad, así como otras características operacionales, con el propósito de:

- Comparar el comportamiento real con el de garantía.
- Comparar diferentes métodos de operación.
- Determinar el comportamiento de diferentes componentes del generador de vapor.
- Comparar el comportamiento durante la combustión de diferentes combustibles.
- Determinar el efecto de cambios en el equipamiento.

Veamos como calcular los términos de la ecuación de balance de energía aplicada al generador de vapor (González & Nordelo 2010).

$$Q_d = Q_1 + Q_p \quad (1)$$

### Cálculo de los calores disponible y útil.

#### Calor Disponible, Qd.

Constituye la energía suministrada por unidad de masa del combustible.

$$Q_d = Q_i + Q_c + Q_{pca} + Q_{vat} \quad (2)$$

#### Calor útil, Q1

Representa la energía transferida al agente de trabajo por unidad de masa de combustible.

$$Q_1 = \frac{[D_v * (h_v - h_{aa}) + D_r * (h_{sr} - h_{er})]}{B_c} \frac{J}{kg} \left( \frac{kJ}{m^3 N} \right) \quad (3)$$

### Metodología de cálculo para determinar la necesidad de colectores solares

#### Demanda energética

Es la energía necesaria para elevar la temperatura de un volumen determinado de agua, desde una temperatura inicial  $T_i$  hasta una temperatura de consumo  $T_f$ .

$$Q = M * C_p * (T_f - T_i) \quad (4)$$

#### Área de captación

Es el área necesaria para captar la energía solar que pueda satisfacer la demanda energética. El área depende de la radiación global y de la eficiencia total del sistema de calentamiento de agua

$$A_{cap} = \frac{Q}{H_p * \eta_g} \quad (5)$$

#### Número de colectores

La cantidad de colectores necesarios para satisfacer la demanda energética está determinada por la relación:

$$N_c = \frac{(A_{cap} * FS)}{A_c} \quad (6)$$

#### Volumen del depósito de almacenamiento

$$V_{dep} = 1.5 * M \quad (7)$$

### Caracterización energética de la Universidad de Cienfuegos.

La UCF es un gran consumidor de la energía eléctrica y de energías no renovables, como el Diesel, es por eso que un estudio de eficiencia energética dentro del centro permite el análisis de cuanto se consume y de cuanto se pierde, por lo que es necesario tomar medidas de ahorro y hacer propuestas

para un mejor funcionamiento. A continuación la Tabla 1 (Ver Anexo 1) muestra el consumo de los principales portadores energéticos del conjunto Caldera-Cocina Comedor.

**Tabla 1. Determinación del personal para un archivo central en la Universidad. (Ver Anexo 1)**

Para el análisis de la eficiencia por ambos métodos se hace necesario conocer los principales datos técnicos de los generadores de vapor (Figura 2) como se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2. Datos propuestos para el Balance Térmico.**

Tipo de combustible	Diesel
Temperatura del agua alimentar	30 0C
Temperatura del combustible	25 0C
Razón de evaporación	13
Flujo de vapor real	364 kg/h
Flujo de vapor nominal	660 kg/h
Presión de vapor (Mínima)	4 kgf/cm2
Presión de vapor (Máxima )	6 kgf/cm2
Temperatura de los gases de salida	180 0C
Valor calórico del combustible Q <sub>i</sub>	43124 kJ/kg



**Figura 2. Generador de vapor pirotubular.**

Antes de seleccionar el Colector Solar a utilizar se hace necesario determinar las principales condiciones de trabajo de los generadores de Vapor, la eficiencia es uno de estos parámetros. Los valores de eficiencia obtenidos por diferentes métodos son.

**Eficiencia por el método directo:**

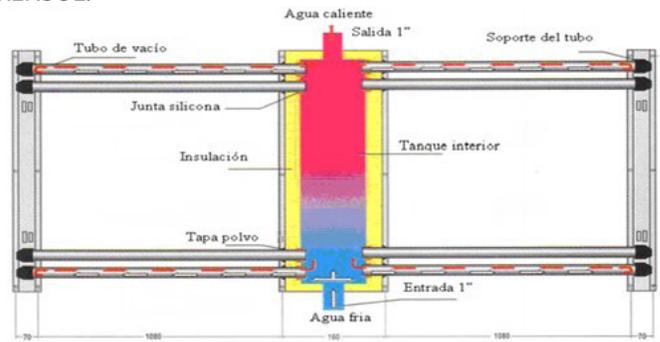
**η=85.9 %**

**Eficiencia por el método indirecto:**

**η=88,5 %**

Posteriormente para la selección del sistema de captación solar se seleccionó un Colector Solar Industrial de Tubos de

Vacío Tipo LPC 47-150SUNNYPower producido en la fábrica RENSOL.



**Figura 3. Colector Solar SUNNY POWER Tipo LPC 47-150.**

La Tabla 3 muestra las características técnicas del colector Solar SUNNYPower Tipo LPC 47-15 de producción nacional.

**Tabla 3. Características Técnicas del Colector solar SUNNYPower Tipo LPC 47-150.**

Tipo de Tubo al vacío	Ø 47 x 1500 mm
Cantidad de Tubos	30
Longitud expuesta del tubo	1.4
Diámetro exterior del tubo	0.047
Diámetro interior del tubo	0.037
Área bruta	3.74 m2
Área de apertura	6.2 m2
Área de Captación	4.88 m2
Área efectiva	3.66 m2
Rendimiento Óptico (Valores tomados del Colector ORCUS)	0.605
Coefficiente Lineal de Pérdidas	0.85 W/m2K
Coefficiente Cuadrático de Pérdidas	0.01 W/m2K2
Coefficiente de Pérdidas Globales	1.92 W/m2K

**Ventajas**

- Alto rendimiento durante todo el año.
- Relación costo de la instalación/litro de agua a 50°C muy bajo.
- Puede ser utilizado con inclinación desde nivel horizontal hasta casi la vertical (2-90°).

Aplicando la Ec 5

$A_{cap}=22 m^2$

**Cálculo del número de colectores a emplear en la instalación.**

Para el cálculo del número de colectores se utilizó el área efectiva del Colector de Tubos al Vacío SUNNYPower de producción nacional de 3 m<sup>2</sup> un poco menor que el 3.66 m<sup>2</sup> que se presenta en el Catálogo

Aplicando la Ec 6

$$N_c=9$$

**Determinación de la Contribución Solar mensual f.**

La Figura 4 refleja el comportamiento de la Cobertura suplida por los captadores solares.

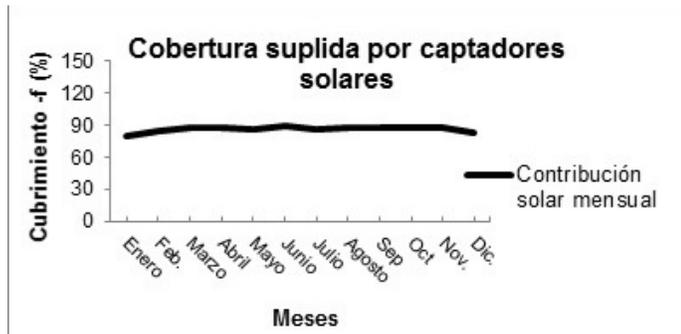


Figura 4. Comportamiento de la Cobertura suplida por los Captadores Solares.

Fuente: Elaboración Propia.

Según la IDEA, una instalación solar debe requerir como mínimo el 70 % de fracción solar para que sea factible (Guía ASIT de la Energía Solar Térmica, 2010). Como se puede observar en todos los meses del año la Cobertura Solar suplida por los Captadores Solares se comportó entre un 80 y un 90 %. El aporte solar anual fue de 17471,93 kWh/año.

Así como la relación entre la demanda de energía y el aporte solar para los meses del año queda representada en la Figura 5.

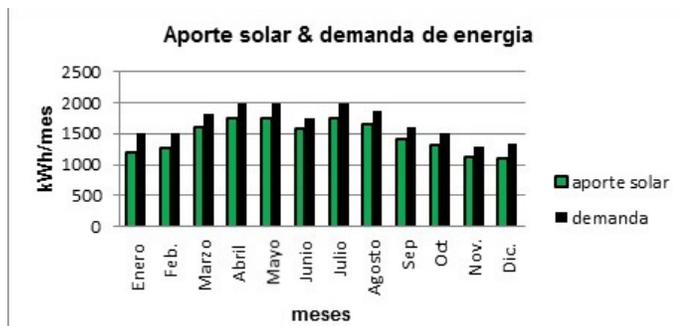


Figura 5. Relación entre la Demanda de Energía y el Aporte Solar.

Fuente: Elaboración Propia.

**Determinación del área de emplazamiento del campo solar.**

Para un total de 9 colectores conectados en 3 ramales. Cada batería constará de 3 colectores, en total se requiere 93 m<sup>2</sup> para su emplazamiento. Para su posible ubicación se analizó la parte superior de la sala de calderas, la misma tiene un total de 180 m<sup>2</sup>.



Figura 6. Vista superior de la Sala de Calderas de la UCF.

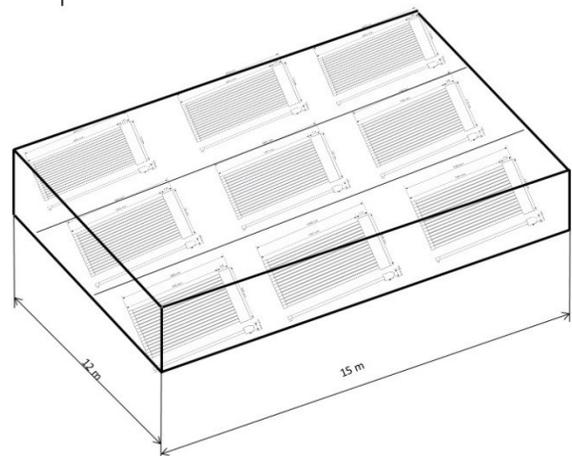


Figura 7. Representación del emplazamiento de la Batería de Colectores Solares.

Esta área necesitaría de un mantenimiento previo al montaje de estos colectores. Se escogió como primera variante para el emplazamiento esta zona ya que está muy próxima a los generadores de vapor, así que las pérdidas serían menores que en otras posibles zonas por este concepto. La figura 7 muestra cómo debería quedar el emplazamiento de esta batería de colectores.

**Ahorro en el Consumo de Combustible a partir de la Implementación de los Captadores Solares**

La Tabla 4 muestra un resumen de la variación del consumo de combustible, en función de la temperatura del agua de alimentación (Taa) para ello el valor de la eficiencia de la caldera se mantiene constante.

**Tabla 4. Variación del Consumo de Combustible en función de la Temperatura.**

Parámetros	Entalpía del Agua de Alimentar (haa) kJ/Kg	Calor Útil (Q1) kJ/Kg	Consumo de Combustible (Ccomb) Lts
(Taa) oC			
25	104.5	967694	140
50	209	929656	100

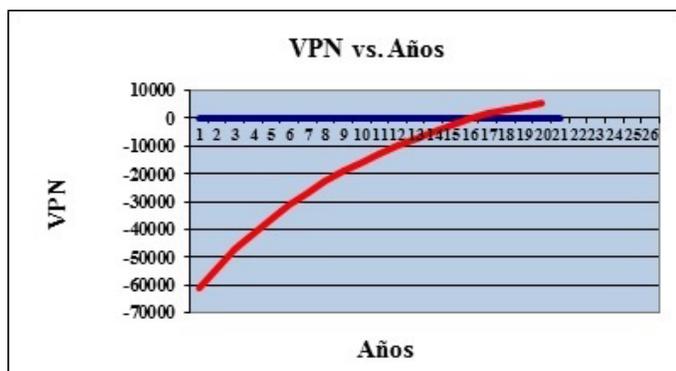
### Análisis de factibilidad del proyecto de climatización solar empleando el valor presente neto (VPN) diferencial.

Para el análisis de la factibilidad del proyecto debe tenerse en cuenta además, el costo de la inversión a realizar. El litro de diesel vale aproximadamente 0,98 MN por lo que anualmente por concepto de combustible se ahorrarán 11760 MN.

Costo individual de cada colector solar \$300 USD

Costo de Montaje y Mantenimiento \$60 USD.

El VPN se basa en calcular el valor presente neto de los flujos de caja proyectados para todos los años durante el período de evaluación del proyecto. Es una medida de las ganancias que puede reportar el proyecto, siendo positivo si el saldo entre beneficios y el gasto es favorable. Los resultados del valor presente neto son mostrados en la Figura 8.



**Figura 8. Estimado de la Inversión del empleo de colectores solares.**

**Fuente: Elaboración propia.**

De la Figura 8 se contempla que la recuperación de la inversión se alcanza en un período de 16 años, apoyándose según el resultado del valor presente neto obtenido. Un análisis de la inversión que conlleva la aplicación de esta tecnología sin la ayuda de programas que las subvencionen, arrojan un resultado negativo de la misma, pues se recupera en un tiempo de explotación de 16 años. Por lo que la aplicación de estos sistemas debe estar ajustada a varias consideraciones.

## CONCLUSIONES

Se caracterizaron las particularidades de los generadores de vapor, su principio de funcionamiento, así como los principales tipos de colectores solares, las características técnicas, y su empleo en el precalentamiento del agua para usos industriales.

La determinación de la Eficiencia del Generador de Vapor por el método directo representó un 85.8 %, así como por el método de las pérdidas o (indirecto) que fue de un 88,2 %.

A partir de la metodología para el cálculo del número de colectores, se seleccionó el tipo de colector solar a emplear, siendo un tipo SUNNY POWER LPC 47-150 producidos por la fábrica RENSOL, necesitando un total de 9 colectores, separados entre ellos una distancia de 3,2 m y emplazándose en un área total de 93 m<sup>2</sup>.

Con la implementación del conjunto de colectores solares se lograron alcanzar temperaturas de alrededor de 50 oC, obteniéndose un ahorro diario de combustible en las calderas de 40 Lts aproximadamente.

De análisis del Valor Presente Neto, se precisan de mejoras que garanticen la recuperación de la inversión en un tiempo relativamente corto.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Avero, M. B. (1997). Compact solar energy collector. *Applied Thermal Engineering*, 17 (4). Recuperado de <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311 ISSN 86010-3>.
- Duff, D., & Winston, R. (1996). Nonimaging solar collector. *Elsevier*, 57(3). Recuperado de <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X>
- Dziwiewa, P., & Zima, W. (2011). Modelling of liquid flat-plate solar collector operation in transient states. *Power and Energy*, 225(1), pp.53–62. Recuperado de <http://doi.org/10.1177/09576509JPE1044>
- Ferekides, C. R. (2011). Solar photovoltaic electricity: current status and future prospects. *Solar Energy*, 85(8).
- Giorgi, C., & Cocco, D. (2012). Energy and economic analysis of concentrating solar power plants based on parabolic trough and linear Fresnel collectors. *Power and Energy*.
- González, R, A., & Nordelo, B, N. (2010). *Combustión y Generación de Vapor*. Universo sur. ISBN 978-959-07-1131-2
- Guía ASIT de la Energía Solar Térmica. (2010). Tomado de [http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Guia\\_Asit\\_de\\_la\\_energia\\_solar\\_termica.pdf](http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Guia_Asit_de_la_energia_solar_termica.pdf)

Kropp, R. (2009). Solar expected to maintain its status as the world's fastest-growing energy technology. Tomado de / <http://www.socialfunds.com/news/article.cgi/2639.html>

Mangal, D., & Kumar, D. (2010). Acknowledgement of evacuated tube solar water heater over flat plate solar water heater. *International Journal of Engineering*, 4 (4), pp.279–284.

Sumathy, K, I. (2013). Solar water heating systems and their market trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 17, pp.1–25.

Zhao, J., & Lu, X. (2014). Analysis of thermal performance of solar collector in solar water heating system. *Advanced Materials*, 1055, pp.193–198.

**ANEXOS****A.1. Consumo de los principales portadores energéticos.**

Portador	Unidad	Valor	TEP	% TEP	Acumulado
Diesel Calderas	Litros	4000	3866,88	99,92276944	99,92276944
Gas licuado	Kg	315	0,38745	0,010011968	99,93278141
E. ELEC	MWh	7,81632	2,6012713	0,067218593	100
TOTALES			3869,86872	100	