

UTILIZACIÓN DE COLECTORES SOLARES EN EL CALENTAMIENTO DE AGUA PARA EL CONTROL DE LA HUMEDAD RELATIVA

Por Ing. Miguel Antonio Céspedes Santiesteban* y Dr. C. César Cisneros Ramírez**

*Centro de Inmunología Molecular (CIM), La Habana, Cuba.

<https://orcid.org/0000-0002-8797-9017>

E-mail: mcespedes@cim.sld.cu

**Centro de Estudios de Tecnologías Renovables (Ceter), Universidad Tecnológica de La Habana, La Habana, Cuba.

<https://orcid.org/0000-0002-9969-801X>

E-mail: cesar@mecanica.cujae.edu.cu

Resumen

En el proyecto se realizó el cálculo de los colectores solares que intervienen en el calentamiento de agua del sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado (CVAA) para el control de la humedad relativa de las manejadoras de aire, a partir del balance energético de los acondicionadores de aire y el cálculo del sistema de calentamiento solar de un edificio de investigaciones y desarrollo. Se seleccionó el equipamiento óptimo para obtener la temperatura de calentamiento adecuada de la red de tuberías y se realizó el cálculo de la factibilidad técnica-económica del mismo.

Palabras clave: colectores solares, humedad relativa, factibilidad técnico-económica.

USE OF SOLAR COLLECTORS IN WATER HEATING FOR RELATIVE HUMIDITY CONTROL

Abstract

The project included the calculation of the solar collectors involved in the water heating of the heating, ventilation and air conditioning (HVAC) system for the control of the relative humidity of the air handlers, based on the energy balance of the air conditioners and the calculation of the solar heating system of the research and development building. The optimal equipment was selected to obtain the adequate heating temperature of the piping network and its technical-economic feasibility was calculated.

Keywords: solar collectors, relative humidity, economic technical feasibility.

I. Introducción

El país se ha empeñado en lograr el 24 % de autoabastecimiento energético con fuentes renovables de energía (Morales, 2019). Para el año 2030 sumará 2334 MW con las nuevas inversiones que se realicen (Minem, 2021) y se espera que el 60 % del incremento del consumo de electricidad se cubra con dichas alternativas, lo que indica que la política de la nación prevé un cambio hacia una economía ecológica, menos dependiente del petróleo, estrategia que aprovecha recursos renovables buscando aumentar su eficiencia económica (Moreno et al., 2021) apoyada en el ahorro de sus finanzas y acrecentando la eficiencia energética.

En las industrias biotecnológicas, mantener la confiabilidad en la producción y la seguridad energética para su operación son vitales. Tanto el personal de energía como el de ingeniería aseguran la operación continua de los equipos y fuentes de energía de la instalación.

La biotecnología cubana (BioCubafarma, 2020) funciona de acuerdo a los estándares dictados por los entes reguladores del sector biofarmacéutico nacional e internacional. La investigación y producción de medicamentos requiere sistemas de climatización para eliminar la posibilidad de contaminación por microorganismos, controlando la presencia de partículas en el ambiente, así como el régimen de temperatura y humedad relativa del local.

La humedad relativa de las zonas limpias es uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta y se reduce pasando agua caliente por los serpentines de los equipos de aire acondicionado.

El tratamiento de este parámetro lleva al personal encargado del mantenimiento de la instalación a realizar enormes esfuerzos para lograr el cumplimiento de los re-

quisitos de los entes reguladores y las buenas prácticas de fabricación (*good manufacturing practices*, GMP).

II. Materiales y métodos

En la investigación, se realizaron los cálculos del balance energético de una instalación de biotecnología y la selección del sistema de calentamiento de agua con colectores solares para realizar el control de la humedad relativa en las manejadoras de aire (Figura 1).

En la Figura 1 se muestra una manejadora de aire o unidad de tratamiento de aire (UTA). El aire del exterior es acondicionado e impulsado con un motor-ventilador a través de filtros y dos baterías de serpentines, en donde ocurre una transferencia de calor entre el agua fría y el aire ambiente, la temperatura del agua requiere un rango de 7 a 12 °C para la climatización y de 60 a 55 °C para la calefacción.

Se recopilaban las especificaciones técnicas de los equipos de acondicionamiento de aire y de los valores climáticos del lugar (Insmet, 2022). Se realizó el balance energético del sistema teniendo en cuenta el balance de masa y energía del proceso de enfriamiento.

Se recopilaban las especificaciones técnicas de los equipos de acondicionamiento de aire y de los valores climáticos del lugar (Insmet, 2022). Se realizó el balance energético del sistema teniendo en cuenta el balance de masa y energía del proceso de enfriamiento.

Balance de masa

Para el aire:

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a \quad (1)$$

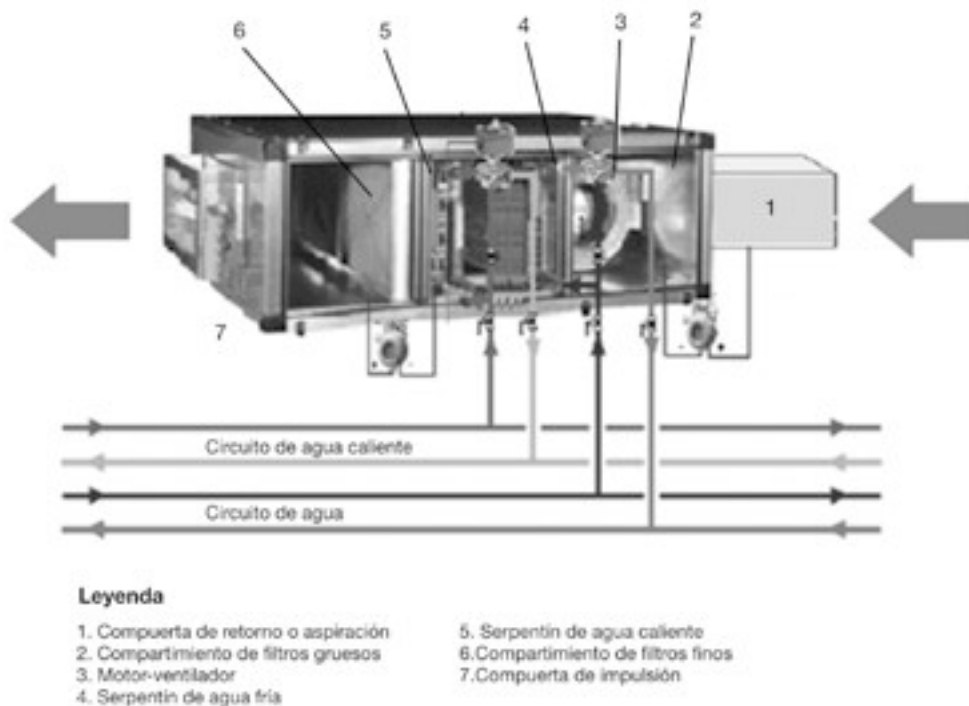


Fig. 1. Manejadoras de aire.

Donde $\dot{m}_{a1}$ es el caudal másico del aire de entrada (kg/s), $\dot{m}_{a2}$ es el caudal másico del aire de salida (kg/s) y caudal másico del aire (kg/s).

Para el agua:

$$\dot{m}_w = \dot{m}_{w1} - \dot{m}_{w2} = (\omega_1 - \omega_2)\dot{m}_a \quad (2)$$

Donde W_1 es la humedad relativa del aire de entrada (%), la humedad relativa del aire de salida (%), $\dot{m}_w$ el caudal másico del agua (kg/s), $\dot{m}_{w1}$ el caudal másico de agua a la entrada (kg/s) y $\dot{m}_{w2}$ el caudal másico de agua a la salida (kg/s).

Balance de energía de la batería fría

$$\dot{m}_a(h_2 - h_1) + \dot{m}_r(h_s - h_e) + \dot{m}_w h_f = 0 \quad (3)$$

Donde $\dot{m}_a$ es el caudal másico del aire (kg/s), h_1 la entalpía del aire a la entrada (kJ/kg), h_2 la entalpía del aire a la salida (kJ/kg), $\dot{m}_r$ el caudal de condensado (L/min), h_s la entalpía del condensado a la salida (kJ/kg), h_e la entalpía del fluido a la entrada (kJ/kg), $\dot{m}_w$ el caudal de agua a la salida de la batería (L/min) y h_f la entalpía del fluido a la salida (kJ/kg).

En la Figura 2 se muestra el serpentín de enfriamiento, donde T_1 es la temperatura del aire a la entrada de la batería (°C), T_2 la temperatura del aire a la salida de la batería (°C) y T_{sup} la temperatura de saturación en la superficie de la batería (°C) y T_r la temperatura de rocío a la temperatura ambiente de la batería (°C).

Se calculó el factor de F_{β} , bypass, que es la parte del aire que no toca la superficie y por lo tanto no se enfría

por este mecanismo, el cual se tomó como parámetro de entrada a la batería de calentamiento.

Factor de bypass

$$F_{\beta} = 1 - \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{sup}} \quad (4)$$

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{a2} + (F_{\beta}) \quad (5)$$

Balance de energía de la batería caliente

$$\dot{Q} = \dot{m}_a(h_2 - h_1) = \dot{m}_f \cdot C_p(T_e - T_s) \quad (6)$$

Donde $\dot{Q}$ es la cantidad de calor generada en la batería caliente (kW), $\dot{m}_a$ el caudal másico del aire (kg/s), h_1 la entalpía del aire a la entrada (kJ/kg), h_2 la entalpía del aire a la salida (kJ/kg), $\dot{m}_f$ el caudal de agua a la salida de la batería (L/min), C_p el calor específico del agua (kJ/kg °C), T_e temperatura de entrada del aire húmedo (°C) y T_s la temperatura de salida del aire húmedo (°C).

El objetivo principal para el calentamiento del aire es determinar la cantidad óptima de agua caliente (m_r) y con ello controlar la humedad relativa deseada en la manejadora de aire (Figura 3).

La Figura 4 representa el diagrama psicrométrico del proceso de enfriamiento con deshumidificación y el proceso de calentamiento, ambos se producen en las climatizadoras de aire.

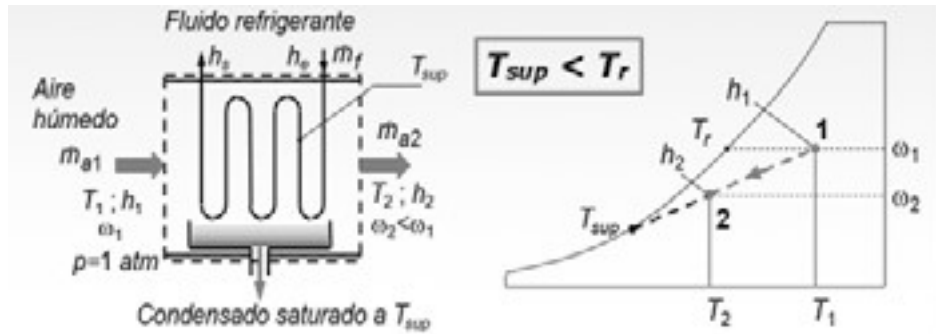


Fig. 2. Proceso de enfriamiento con deshumidificación.

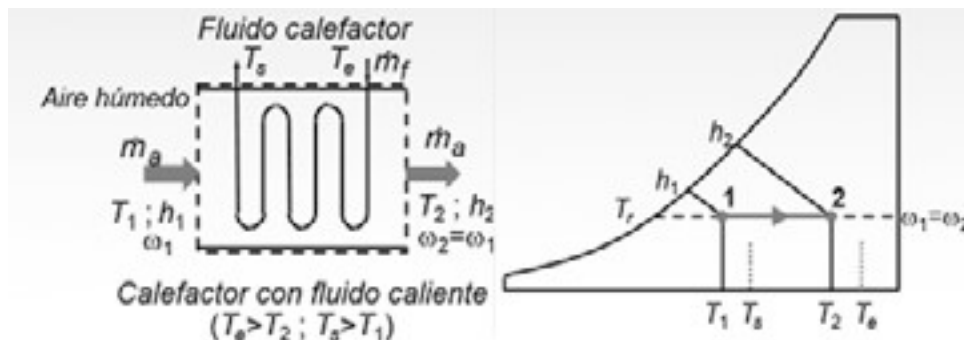


Fig. 3. Proceso de calentamiento de aire.

Cálculo de la demanda energética diaria de agua caliente en el colector

$$Q_{ac} = \dot{m}_f * \rho * C_p * (T_{uso} - T_{AF}) \quad (7)$$

Donde Q_{ac} es la demanda energética diaria de agua caliente en el colector (kW/día), $\dot{m}_f$: el caudal de agua caliente (L/día), ρ la densidad del agua (1 kg/L), C_p el calor específico del agua (0.00116 kW-h/kg °C), T_{uso} la temperatura de uso (60 °C) y T_{AF} la temperatura de agua fría o red (22.5 °C).

Para el cálculo de la carga térmica de los colectores se tuvieron en cuenta los datos de la instalación:

- Ubicación de la instalación
- Inclinação de los colectores (Bérriz, 2004)
- Altitud de la instalación
- Área de azotea libre de obstáculos
- Temperatura del medioambiente
- Temperatura promedio de la red
- Temperatura de almacenamiento
- Valores promedios mensuales de radiación (Insmet, 2022)

Al culminar el cálculo del balance energético total, se procedió a realizar el cálculo para la selección de los colectores solares de agua (Alemany, 2008) teniendo en cuenta el método F-Chart.

Cálculo del área de captación (método F-Chart)

El método F-Chart (Winscoinsin, 2016) es una herramienta que permite estimar el desempeño promedio a largo plazo de un sistema solar-térmico teniendo en cuenta las siguientes ecuaciones:

Cálculo de la energía absorbida por el colector

$$E_a = S_c * F_r * \tan * R * N \quad (8)$$

$$D_1 = E_a / Q_{ac} \quad (9)$$

Donde E_a es la energía absorbida por el colector (kWh/mes), S_c la superficie del colector (m²), F_r tan el factor de

eficiencia óptica del colector o factor de ganancia, R la radiación solar media horizontal (kWh/m² día), N los días del mes y D_1 la relación entre la energía absorbida por el colector (E_a) y la demanda o carga energética mensual en el colector (Q_{ac}).

Cálculo del sistema de acumulación

Primera mente se analizará la conveniencia de un sistema de acumulación, de ser así, será necesario que el recipiente tenga la capacidad suficiente para proporcionar la cantidad de calor necesario con el fin de mantener la temperatura deseada del agua tomando en cuenta las pérdidas de calor que pudiese haber.

El volumen del acumulador y su sistema de calentamiento deberán cumplir con los criterios de diseño teniendo en cuenta las recomendaciones técnicas de expertos del documento básico de ahorro de energía de instalaciones termo solares (Instalaciones solares térmicas, 2019):

$$50 \leq (V/A) < 180 \quad (10)$$

$$60 \leq (M/A) \leq 100 \quad (11)$$

$$0,8 \leq (V/M) \leq 1,2 \quad (12)$$

$$1,25 \leq 100 * A/M \leq 2 \quad (13)$$

Donde V es el volumen del depósito de acumulación solar (L), A la suma total de las áreas de los captadores solares (m²) y M la demanda diaria (L/día).

Cálculo del sistema de intercambio de calor

Utilizaremos intercambiadores incorporados al acumulador. Su dimensionamiento se realiza teniendo en cuenta los criterios de diseño y las recomendaciones técnicas de expertos del documento básico de ahorro de energía de instalaciones termo solares (Instalaciones solares térmicas, 2019) con las condiciones siguientes:

$$(S/A) \geq 0,15 \quad (14)$$

Donde S es la superficie del intercambiador (m²) y A la suma total de las áreas de los captadores solares (m²).

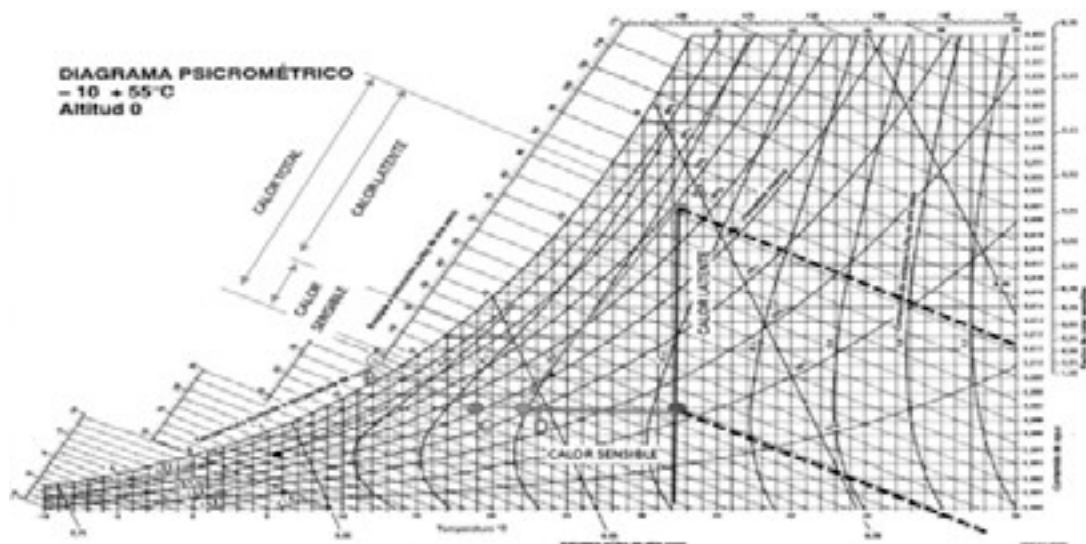


Fig. 4. Diagrama psicrométrico del proceso de climatización.

Cálculo del factor de corrección por almacenamiento

Para el cálculo del K_1 se analizaron varios criterios a tener en cuenta según la condición siguiente:

$$K_1 = \left[\frac{V_{acum}}{75 \cdot S_c} \right]^{-0,25} \quad (15)$$

Donde V_{acum} es el volumen de acumulación y S_c la superficie del colector (m^2).

Cálculo del factor de corrección que relaciona las distintas temperaturas

$$K_2 = \frac{[11,6 + 1,18 \cdot T_{ac} + 3,86 \cdot T_{red} - 2,32 \cdot T_a]}{100 - T_a} \quad (16)$$

Donde T_{ac} es la temperatura de acumulación ($^{\circ}C$), T_{red} la temperatura de la red ($^{\circ}C$) y T_a la temperatura ambiente ($^{\circ}C$).

Cálculo de la energía perdida en el colector

$$E_p = S_c \cdot F_r \cdot U_L \cdot (100 - t_a) \cdot \Delta t \cdot K_1 \cdot K_2 \quad (17)$$

$$D_2 = E_p / Q_a \quad (18)$$

Donde E_p es la energía perdida en el colector (kWh/mes), S_c la superficie del colector (m^2), $F_r \cdot U_L$ la pendiente de la curva característica del colector o coeficiente global de pérdidas del colector (kW/ m^2K), Δt el periodo de tiempo considerado (horas), D_2 la relación entre la energía perdida por el colector (E_p) y la demanda o carga energética mensual (Q_a).

La ecuación de cálculo de la fracción solar utilizada en este método puede apreciarse en la fórmula siguiente:

$$f = 1,029 D_1 - 0,065 D_2 - 0,245 D_1^2 + 0,0018 D_2^2 + 0,0215 D_1^3 \quad (19)$$

III. Resultados y discusión

Tomando como dato las demandas energéticas totales de las manejadoras del área limpia, se calculó el porcentaje de cobertura y la fracción solar anual (Tabla 1).

El esquema de agua caliente (Figura 5) está compuesto por un sistema de circulación forzada:

1. Sistema de captación por colectores solares de baja temperatura
2. Sistema de bombeo primario y secundario de agua caliente
3. Sistema de control
4. Sistema de acumulación
5. Sistema de conexión por tuberías
6. Manejadoras de aire

Se realizó la selección de equipos del catálogo técnico Chromagen (Chromagen, 2022) (Tabla 2).

Tabla 1. Resultados totales del índice de cobertura

Meses	Demanda energética total (kWh/mes)	Energía útil total (kWh/mes)	Cobertura (%)	Fracción solar, f (%)
Enero	136 101,89	10 507,52	0,08	0,52
Febrero	122 930,74	10 827,71	0,09	0,60
Marzo	132 741,35	12 573,65	0,09	0,64
Abril	123 581,17	12 337,02	0,10	0,68
Mayo	122 659,73	12 354,08	0,10	0,68
Junio	117 076,90	11 672,61	0,10	0,67
Julio	117 618,92	12 310,20	0,10	0,71
Agosto	117 618,92	12 743,43	0,11	0,73
Septiembre	113 824,76	12 542,92	0,11	0,75
Octubre	122 659,73	12 605,13	0,10	0,70
Noviembre	123 581,17	11 192,50	0,09	0,61
Diciembre	134 421,62	10 674,58	0,08	0,54
	484 816,92	142 341,36	10 %	65 %

Tabla 2. Selección del equipamiento térmico

Resultados	Valores	Unidades	Marca	Referencia
No Colectores	80	unidad	Chromagen	CALSo16
Área total de captación solar	173,60	m^2		
No acumuladores	10	unidad		
Volumen de acumulación total ($V_{acum total}$)	15000	L		

Cálculo económico

Se realizó el cálculo económico (Tradex Solar, 2018) teniendo en cuenta los principales parámetros que rigen la economía de la energía solar térmica (Tabla 3, figuras 6 y 7).

- Costos de capital (Capex)
- Costos operativos (OPEX)
- Costos de generación de calor
- Vida útil de los colectores térmicos



Fig. 5. Esquema de agua caliente de la instalación.

Tabla 3. Resultados totales de la inversión

Años del proyecto	0	25
Costo de equipamiento en CUP (MP)	63 501,32	1 587 533,04
Costos de instalación y puesta en marcha en CUP (MP)	635,01	15 875,33
Costos operativos en CUP (MP)		
Costos anuales de operación y mantenimiento en CUP (MP)		1604
Costo de generación en CUP (MP)	64 136,33	1 603 408,37
Vida útil de la instalación		
25 años		
Ingresos anuales en CUP (MP)		738 218,88
Energía eléctrica producida (kWh/año)		3 558 534,04
Flujo de caja en CUP (MP)		11 109 436,61
VAN 6 292 103,39		TIR 46,49 %

*MP: Miles de pesos



Fig. 6. Tasa interna de retorno (TIR) en relación al valor actual neto (VAN).

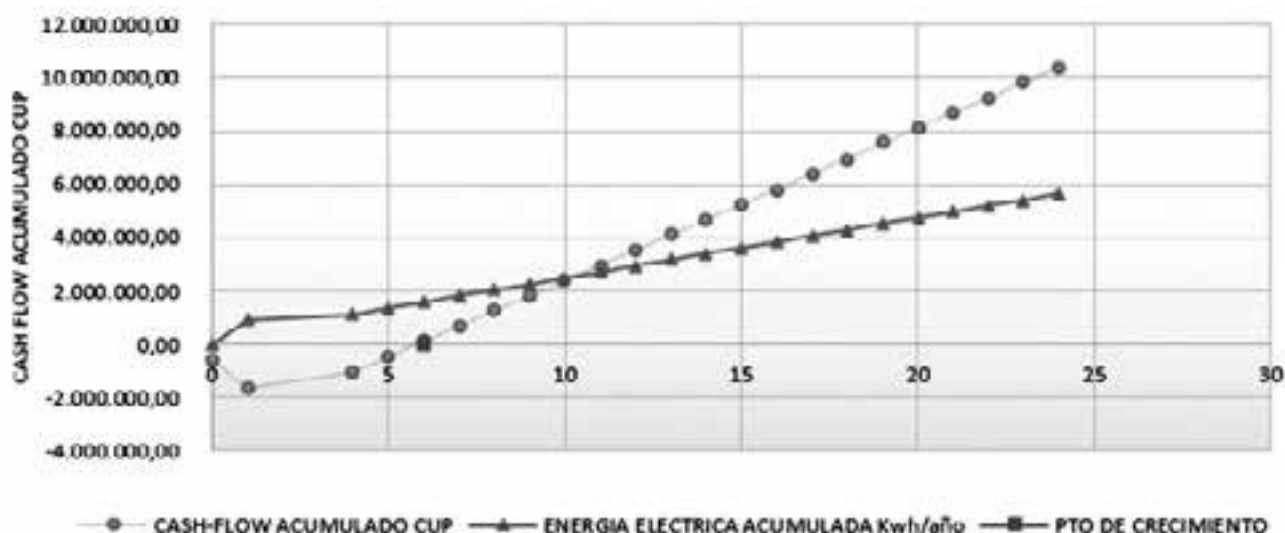


Fig. 7. Análisis de factibilidad del proyecto.

Impacto ambiental

El estudio logró una reducción importante de las emisiones de CO₂, alcanzando el valor de 103 t de CO₂ a la atmósfera (Álvarez y Vargas, 2014), la eliminación de humos y malos olores contribuyeron a la reducción de las emisiones de otros gases de efecto invernadero, lo que permitió a la edificación una ganancia de energía por concepto de ahorros.

*Ahorro de fuel TCE = 43,96 * 7,35 = 323,10 barriles de petróleo.*

Donde TCE es el combustible total equivalente ahorrado producto de la eliminación de las emisiones de CO₂.

Teniendo en cuenta el costo del barril de petróleo (95,2 USD) de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) se obtiene el equivalente de ahorro de 30 759,12 USD o 738 218,88 CUP anual.

IV. Conclusiones

Controlar y reducir la humedad relativa es posible con la utilización de una energía limpia no dependiente del petróleo. El uso de estas fuentes alternativas de energía proporciona un beneficio ambiental que implica la reducción de las emisiones de CO₂.

La incorporación de una instalación solar a una red de climatización existente puede suponer una mejora de la calificación energética de cada edificio abastecido, los que dependerán de la fuente de energía convencional empleada y de la fracción solar abastecida.

Se recomienda que las instalaciones de colectores solares para la climatización sean combinadas con otras fuentes de energía, adaptadas a las múltiples formas existentes de los sistemas de generación sin distorsionar la producción energética convencional.

V. Referencias bibliográficas

- Alemaný Gutiérrez, E. (26 de febrero de 2008). Calentadores solares se suman a la revolución. energética. *Guerrillero*
- Álvarez Brito, A. F. y Vargas Blandino, D. (2014). *Las emisiones de gases de efecto invernadero y su mitigación por el sector agrario cubano*. Ediciones INCA. <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjFy8iHoLj8AhXQSzABHeauCjsQFnoECAGQAQ&url=https%3A%2F%2Fediciones.inca.edu.cu%2Ffiles%2Ffolletos%2Ffolletocambioclimatico.pdf&usg=AOvVawoJfrn3n4pek1Ml4XsBLtoI>
- Bérriz Pérez, L. (2004). Influencia del ángulo de inclinación de una superficie captadora solar sobre la radiación incidente. *EcoSolar 8*, ISSN 1028-6004
- BioCubafarma (2020). La Biotecnología en Cuba. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*, 10 (2).
- Chromagen. (2022). *Catálogo técnico Chromagen*. www.chromagen.es
- Insmet (2022). *Promedio climatológico de La Habana*. <http://www.insmet.cu/asp/genesis.asp?TBo=PLANTILLAS&TB1=ccCLIMA&TB2=/CLIMA/CC/ccNoviembre2022.htm>
- Instalaciones solares térmicas. (2019). *Sección HE4 contribución solar mínima de agua caliente sanitaria*. <https://docplayer.es/amp/14729760-Instalaciones-solares-termicas-predimensionado-y-dimensionado-grupo-formadores-andalucia.html>
- Minem (2021). *Ministerio de Energía y Minas. Energías Renovables y Eficiencia Energética, Políticas y Lineamientos*. www.minem.gob.cu
- Morales Pedraza, J. (2019). Solar Energy in Cuba: Current Situation and Future Development. *Journal of Solar Energy Research Updates*, 6, 1-17.
- Moreno Figueredo, C. et al. (2021). Fuentes renovables de energía. Tecnología y aplicaciones. Editorial Cubasolar, La Habana, ISBN 978-959-7113-67-6
- Sarmiento Sera, A. (2013). Demanda energética. *Energía Solar Fotovoltaica*. Editorial Cubasolar, La Habana, ISBN 978-959-2375-51-8

- Saunders, E. A. (1988). *Heat exchangers selection, design y construction*. New York. John Wiley & Sons, pp. 3-83, 475-524.
- Tradex Solar (2013). Análisis económico de un proyecto de autoconsumo solar. <https://blog.solartradex.com/analisis-economico-de-un-proyecto-de-autoconsumo-solar/>
- Wilson, S. (2010). Integrating Solar Heating into an Air Handling Unit to Minimize Energy Consumption. College of Technology Directed Projects <http://docs.lib.purdue.edu/techdir-proj/14>
- Winscoinsin, f. c. (2016). Cálculo Método F-Chart. <http://www.solarweb.com>

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Contribución de los autores: Miguel Antonio Céspedes Santiesteban, conceptualización, investigación, redacción-revisión y edición; César Cisneros Ramírez, análisis formal, metodología, supervisión y redacción-borrador original.

Recibido: 21 de octubre de 2022

Aprobado: 15 de noviembre de 2022