



Quattro  
Victron energy

SESTIMA INTEGRADO DE CONTROL PARA EL ABASTECIMIENTO DE ENERGÍA MEDIANTE SISTEMAS HÍBRIDOS EN COMUNIDADES AFINADAS DE CUBA, FASE 6

DIRECTOR GENERAL

Dr. C. Luis Bériz Pérez

EDITORES

M.Sc. Madelaine Vázquez Gálvez  
Ing. Jorge Santamarina Guerra  
Lic. Mónica Cuéllar Céspedes

CONSEJO EDITORIAL

M. Sc. Ramón Acosta Álvarez  
Dr. C. Luis Bériz Pérez  
M. Sc. Ricardo Bériz Valle  
Dra. C. Leidy Casimiro Rodríguez  
Ing. Otto Escalona Pérez  
Dra. Cs. Dania González Couret  
Ing. Miguel González Royo  
Dr. C. José A. Guardado Chacón  
Lic. Bruno Henríquez Pérez  
Ing. Nilo Ledón Díaz  
M. Sc. Martha Mazonza Mestre  
Dr. C. Conrado Moreno Figueredo  
Dr. C. Rafael Parúas Cuza  
Dr. C. Joel Morales Salas  
Dr. C. Daniel Stolik Novygrad  
M. Sc. Madelaine Vázquez Gálvez

DISEÑO Y COMPOSICIÓN

Alejandro F. Romero Ávila

WEB MASTER

Omar Dieppa Castellanos

*Eco Solar*, no. 82 / 2022

Revista científica de las  
fuentes renovables de energía  
octubre-diciembre, 2022  
ISSN-1028-6004  
RNPS-2220



PATROCINADORES

**CETER**



DIRECCIÓN

Calle 20, No. 4113,  
entre calles 18A y 47,  
Playa, La Habana, Cuba  
TELÉFOS.: (53) 72040010; 72062061

madelaine@cubasolar.cu  
HTTP://www.cubasolar.cu



**CONTENIDO**

<b>PROPUESTA DE DISEÑO DE BIODIGESTOR DE CÚPULA FIJA PARA EL CENTRO PORCINO DE LA GRANJA UNIVERSITARIA EL GUAYABAL.....</b>	<b>3</b>
Yanoy Morejón Mesa, Vilma Moreno Melo y Jenifer Álvarez Lima	
<b>UTILIZACIÓN DE COLECTORES SOLARES EN EL CALENTAMIENTO DE AGUA PARA EL CONTROL DE LA HUMEDAD RELATIVA.....</b>	<b>11</b>
Miguel Antonio Céspedes Santiesteban y César Cisneros Ramírez	
<b>POTENCIAL DE IMPLEMENTACIÓN DE MICRORREDES ENERGÉTICAS EN CUBA.....</b>	<b>19</b>
Roberto Sosa Cáceres, Enrique Viant Garrido, Ariel Rodríguez Rosales, Alfredo Curbelo Alonso y Manuel Álvarez González	
<b>CÁLCULO DE UN SISTEMA DE ACUMULACIÓN DE ENERGÍA CON MATERIAL DE CAMBIO DE FASE (MCF) PARA UN SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN POR ABSORCIÓN.....</b>	<b>28</b>
César A. Cisneros Ramírez y Ariel Díaz León	

editorial  
cubasolar

# PROPUESTA DE DISEÑO DE BIODIGESTOR DE CÚPULA FIJA PARA EL CENTRO PORCINO DE LA GRANJA UNIVERSITARIA EL GUAYABAL

Por Dr. C. Yanoy Morejón Mesa\*, Dra. C. Vilma Moreno Melo\*\* y M. Sc. Jenifer Álvarez Lima\*\*\*

\* Universidad Agraria de La Habana, Mayabeque, Cuba.

<https://orcid.org/0000-0002-1125-3105>.

E-mail: ymorejon83@gmail.com, ymm@unah.edu.cu

\*\* Universidad de Cundinamarca, Fusagasugá, Colombia.

<https://orcid.org/0000-0002-1982-3993>

E-mail: vilma@ucundinamarca.edu.co

\*\*\* Universidad Agraria de La Habana, Mayabeque, Cuba.

<https://orcid.org/0000-0003-4456-269X>

E-mail: jenifer93@unah.edu.cu

## Resumen

La investigación se orientó hacia la propuesta de diseño de un biodigestor de cúpula fija y del potencial energético a obtener de este sistema una vez instalado en la granja universitaria El Guayabal de la Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez en la provincia Mayabeque, Cuba. Para ello, se determinó la especie animal existente en el escenario, dado que aportará los residuos orgánicos hacia el biodigestor, y la cantidad de animales, considerándose el movimiento de rebaño, lo cual posibilitaría determinar la biomasa generada diariamente con el propósito de establecer el dimensionamiento de la tecnología de biodigestor adecuada y conocer el comportamiento de los parámetros energéticos. Como resultado principal, se diseñó un biodigestor de cúpula fija (50 m<sup>3</sup>) adecuado para la granja. Se demostró, a pesar de los costos elevados por concepto de materiales para este tipo de tecnología (biodigestor de cúpula fija), el ahorro energético, preservación del medioambiente y disponibilidad local de los materiales requeridos para la construcción de la instalación, aspecto que no limitará la ejecución de la obra ingenieril.

*Palabras clave: energía renovable, producción porcina, digestión anaerobia, factibilidad energética, impacto ambiental.*

---

## DESIGN PROPOSAL OF A FIXED DOME BIODIGESTOR FOR THE PIG CENTER OF THE EL GUAYABAL UNIVERSITY FARM

### Abstract

The research was oriented towards the design proposal of a fixed dome biodigester and the energy potential to be obtained from this system once installed in the university farm El Guayabal of the Agrarian University of Havana Fructuoso Rodriguez Perez in Mayabeque province, Cuba. For this purpose, the existing animal species in the scenario was determined, given that it will provide the organic waste to the biodigester, and the number of animals, considering the herd movement, which would make it possible to determine the biomass generated daily in order to establish the sizing of the appropriate biodigester technology and to know the behavior of the energy parameters. As a main result, a fixed dome biodigester (50 m<sup>3</sup>) suitable for the farm was designed. In spite of the high cost of materials for this type of technology (fixed dome

biodigestor), the energy savings, environmental preservation and local availability of the materials required for the construction of the installation were demonstrated, an aspect that will not limit the execution of the engineering work.

**Keywords:** *renewable energy, pig production, anaerobic digestion, energy feasibility, environmental impact.*

## I. Introducción

El mundo enfrenta dos problemas básicos para la existencia y el progreso futuro de la humanidad: la detención de la creciente contaminación ambiental y la búsqueda y obtención de nuevas fuentes de energía (Guardado, 2006). La única forma de contar con un futuro energético seguro es hallar una vía ambientalmente sostenible para producir y utilizar la energía. Si no se da respuesta a las preocupaciones de la sociedad sobre la energía y el medioambiente, peligrará el suministro energético constante y seguro del que dependen las economías (Priddle, 1999). Resulta necesario aprovechar las fuentes renovables de energía basadas en la mejor utilización de los recursos locales y tecnologías apropiadas, de modo que contribuyan al ahorro de combustible convencional y sirvan para devolver al suelo los nutrientes que este necesita y preserven el medio ambiente de la contaminación (Santos *et al.*, 2011).

Un claro ejemplo de las fuentes de energía renovable es la biomasa, término que se refiere a toda la materia orgánica generada a partir de la fotosíntesis o bien producida por la cadena trófica, y como materia prima para procesos de reciclaje, teniendo como origen el excremento animal recién expulsado a lo cual se le suman los desperdicios como camas, residuos de comida o material añadido (Grundey, 1982).

La digestión anaerobia constituye una buena alternativa para tratar residuos con elevada materia orgánica biodegradable (Sosa, 2017; Flotats *et al.*, 2001). Por lo tanto, este tratamiento está indicado para aguas residuales agroindustriales con alta carga de materia orgánica biodegradable; vertidos procedentes de la producción de azúcar, alcohol, cárnicos, papel, conservas y destilerías (Rahayu *et al.*, 2015; Suárez *et al.*, 2018); residuos agropecuarios, como purines y estiércol (Bansal *et al.*, 2017) y residuos urbanos que comprenden tanto la fracción orgánica de los residuos sólidos (Biogas Association, 2015) como los lodos de las depuradoras de aguas residuales urbanas (Frankiewicz, 2015).

Precisamente el biodigestor es antropogénicamente la tecnología a destacar en el proceso biotecnológico de digestión anaeróbica de biomasa para obtener biogás. Es un reactor hermético con una entrada lateral para la materia orgánica, un escape en la parte superior por donde fluye el biogás, y una salida para la obtención de efluentes con propiedades biofertilizantes, contribuyendo ambos productos a resolver las necesidades de los productores y al fomento de la agricultura orgánica, como una alternativa económicamente factible y ecológicamente sustentable (Zheng *et al.*, 2012).

A estos aspectos habría que agregar los altos precios de los combustibles y las elevadas tarifas locales de la energía eléctrica, siendo factores a considerar para la introducción de biodigestores o plantas de biogás a nivel nacional y regional que produzcan energía a partir del uso de los desechos de la producción agropecuaria (Parra *et al.*, 2019).

Considerándose los criterios anteriormente descritos, en la granja universitaria El Guayabal, localizada en la capital San José de las Lajas, en la provincia Mayabeque, Cuba, se realizó el diseño de un biodigestor de cúpula fija, con el objetivo de producir biogás y biofertilizantes, por lo que la investigación se orientó a determinar el dimensionamiento y las potencialidades energéticas del uso de esta tecnología en ese sistema productivo.

## II. Materiales y métodos

### Caracterización de la granja universitaria El Guayabal

La granja universitaria El Guayabal, perteneciente a la Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez, dispone de una superficie total de 665,8 ha, de las cuales 100 ha se dedican a la producción agrícola para el consumo animal y humano, el resto a la producción ganadera (porcina, bovina, ovino-caprino, cunícula, avícola, apícola y piscícola).

El suelo que existe en el escenario es ferralítico rojo típico (Hernández *et al.*, 2015). Tiene un relieve llano, altura sobre el nivel del mar de 120 m. Las variables meteorológicas registradas durante el periodo 2015-2021 mostraron temperaturas máximas que superaron los 26 °C, entre los meses de junio a septiembre, y las más frías con un promedio de hasta 20,76 °C en enero. Las precipitaciones manifestaron incrementos a partir de mayo e indicaron los valores medios más elevados en junio y agosto con 255,50 y 245,16 mm respectivamente. La humedad relativa varió entre el 72,8 % (mínimo en marzo) y el 84,6 % (máximo en diciembre), mientras que la velocidad del viento expresó su tope máximo de 5,46 km/h durante el mes de febrero.

El centro porcino posee una capacidad total de 425 animales (en todas las categorías productivas), con un sistema de alimentación alternativo que utiliza el alimento ensilado cubano (AEC), como parte de la fracción energética que necesitan los cerdos para su desarrollo, y los piensos secos (PS) balanceados, para cubrir la proteína que requieren. Para la operatividad del sistema productivo se dispone de un molino forrajero, con motor eléctrico de 4,5 kW destinado a la elaboración de alimentos alternativos, una bomba hidráulica, con una potencia de 5,5 kW destinada a las labores de limpieza y abastecimiento de agua, y 40 luminarias de 40 W.

### Metodología para el dimensionamiento de biodigestores de cúpula fija

Para el cálculo de los parámetros de diseño de un biodigestor de cúpula fija, es necesario conocer los datos de entrada y los que deben ser determinados (Tabla 1).

La cantidad diaria de material (Bmd) está en función directa con la cantidad de biomasa que se genera, ya sean residuos domésticos, agrícolas o de origen animal. Además, se debe tomar en cuenta la cantidad máxima que se obtiene y los planes de incrementos productivos.

Tabla 1. Datos de entrada y salida requeridos para el diseño de un biodigestor anaerobio de cúpula fija

Parámetros	Unidad
<b>Datos de entrada</b>	
Cantidad de biomasa diaria generada (Bmd)	Kg/día
Proporción excreta-agua (N)	L/kg
Rendimiento de biogás (Y)	m <sup>3</sup> /kg
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	día
<b>Datos de salida</b>	
Volumen diario de material (mezcla estiércol y agua) (Vdm)	m <sup>3</sup> /día
Volumen del biodigestor (V <sub>biodig</sub> )	m <sup>3</sup>
Volumen de la cámara de fermentación (V <sub>cf</sub> )	m <sup>3</sup>
Volumen del cilindro (V <sub>c</sub> )	m <sup>3</sup>
Volumen de contención del biogás (V <sub>2</sub> )	m <sup>3</sup>
Volumen del cono base (V <sub>3</sub> )	m <sup>3</sup>
Volumen del tanque de compensación (V <sub>tc</sub> )	m <sup>3</sup>

La cantidad de biomasa diaria generada (Bmd), expresada en kg/día, se determina a través de la expresión 1:

$$Bmd = Ca \times Ce \times Rp \times Rt \tag{1}$$

Donde *Ca* es la cantidad de animales, *Ce* la cantidad de excreta por animal (kg/día), *Rp*, la relación entre el peso vivo promedio de la población animal y el peso vivo equivalente tabulado y *Rt* la fracción entre el tiempo de estabulación respecto a la duración del día (h/día).

$$Bmd = Ca \times Ce \times \left( \frac{PVp}{PVe} \right) \times \left( \frac{Te}{24h} \right) \tag{2}$$

En la expresión 2, *PVp* es el peso vivo promedio de la población animal (kg), *PVe* el peso vivo equivalente tabulado, *Te* las horas que el animal permanece estabulado (h/día). El volumen diario de material (Vdm), mezcla estiércol y agua, no es más que la suma del residual y la dilución de la biomasa (residual y agua).

$$Vdm \text{ (m}^3\text{/día)} \tag{3}$$

En la expresión 3, *N* es la proporción excreta-agua (L/kg), se requiere conocer que la densidad del agua es 1000 kg/m<sup>3</sup>. Luego, el valor obtenido se expresa en kg/día, pero al considerarse la densidad volumétrica del agua, se divide este valor por dicha densidad, entonces se expresaría en m<sup>3</sup>/día.

El volumen del biodigestor (V<sub>biodig</sub>) se calcula teniendo en cuenta el valor del volumen de material mezcla estiércol y agua (Vdm) que entra al biodigestor y el tiempo de retención (TRH) (expresión 4).

$$V_{biodig} \text{ (m}^3\text{)} \tag{4}$$

Una vez determinado el volumen del biodigestor, se calcula el volumen de diseño a partir de dos posibles opciones:

- Tratar todo el residual y obtener los subproductos derivados.
- Tratar solamente la parte del residual que garantice la energía requerida.

Las expresiones fundamentales que se emplean para el dimensionamiento de un biodigestor de cúpula fija, caracterizado por sus partes cónica, cilíndrica y casquete esférico (Figura 1), se plantean a continuación.

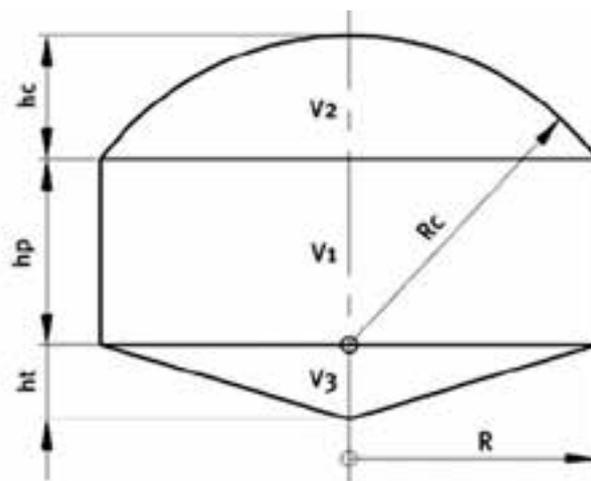


Fig. 1. Partes principales en las que se divide un biodigestor de cúpula fija (Guardado, 2007).

Los pasos a seguir para su empleo son los siguientes:

- Se calcula el volumen total del biodigestor (V<sub>biodig</sub>), sobre la base del volumen de la mezcla agua-estiércol y el tiempo de retención, como se mostró en la expresión 4.
- Se calcula el radio del volumen predefinido (R).

Para calcular el radio del volumen predefinido (R), se plantea la expresión 5: R (m)

$$R = \sqrt[3]{\frac{V_{biodig}}{\pi \times 1,121}} \tag{5}$$

Teniéndose el radio del volumen predefinido (R), se procede a determinar la unidad proporcional (U) en metros (expresión 6):

$$U(m) \\ U=R\div 4 \quad (6)$$

La unidad proporcional permitirá determinar el resto de las denominaciones, sustituyendo U en las proporciones siguientes:

$$Rc(m) \\ Rc = 5\times U \quad (7)$$

$$D(m) \\ D = 8\times U \quad (8)$$

$$hc(m) \\ hc = 2\times U \quad (9)$$

$$hp(m) \\ hp = 3\times U \quad (10)$$

$$ht(m) \\ ht = 0,15\times D \quad (11)$$

En las expresiones 7, 8, 9, 10 y 11, dadas en metros, Rc es el radio de la cúpula, D el diámetro, hc la altura de la cúpula, hp la altura del cilindro y ht la altura del cono base.

A partir de la determinación de los principales parámetros geométricos se procede a calcular los volúmenes correspondientes al cilindro ( $V_1$ ), de contención del biogás ( $V_2$ ), cono base ( $V_3$ ) y volumen de la cámara de fermentación ( $V_{cf}$ ) (expresiones 12, 13, 14 y 15):

$$V_1(m) \\ V_1=R^2 \times hp \times \pi \quad (12)$$

$$V_2(m) \\ V_2 = \frac{\pi \times hc^2}{3} (3R - hc) \quad (13)$$

$$V_3(m) \\ V_3 = R^2 \times \pi \times \left(\frac{ht}{3}\right) \quad (14)$$

$$V_{cf}(m) \\ V_{cf}=V_1+V_2+V_3 \quad (15)$$

Posteriormente se procede al cálculo del volumen diario de biogás producido (G):

$$G(m^3/día) \\ G = Y \times Bmd \quad (16)$$

En la expresión 16, Y es el rendimiento de biogás, dado en  $m^3/día$  (Tabla 1). Esta variable se determina en la expresión 17, donde Ce, analizada en la expresión 1, es la cantidad de excreta por animal (kg/día) y X es el coeficiente de conversión energética de la excreta producida diariamente, o sea, la producción diaria de biogás en función del tipo de residuo orgánico.

$$Y(m^3/día) \\ Y = \frac{X}{C_e} \quad (17)$$

Para todos los tipos de biodigestores, el volumen del tanque de compensación ( $V_{tc}$ ) es equivalente al volumen de gas producido, o sea, oscila entre el 25 y 30 % del volumen del biodigestor.

### III. Resultados y discusión Dimensionamiento del biodigestor

Para el correcto dimensionamiento del biodigestor de cúpula fija se requiere determinar los parámetros siguientes:

- Cantidad de biomasa diaria generada (Bmd)
- Volumen diario de material (mezcla estiércol y agua) (Vdm)
- Volumen del biodigestor ( $V_{biodig}$ )
- Volumen de la cámara de fermentación ( $V_{cf}$ )
- Volumen del cilindro ( $V_1$ )
- Volumen de contención del biogás ( $V_2$ )
- Volumen del cono base ( $V_3$ )
- Volumen del tanque de compensación ( $V_{tc}$ )

Los resultados obtenidos de cada uno de estos parámetros se representan en la Tabla 2, estos valores se obtienen a partir del movimiento del rebaño concebido por la dirección de la granja durante el periodo 2021-2022.

#### Aporte energético potencial

Para determinar el aporte energético potencial a obtener en función de la cantidad de animales disponibles, se requieren los parámetros siguientes:

- Rendimiento de biogás (Y)
- Volumen diario de biogás (G)

Tabla 2. Movimiento del rebaño en la granja El Guayabal

Movimiento del rebaño	Existencia inicial	Existencia final	Animales por día	Masa promedio (kg)
Sementales	5	5	5	130
Reproductoras	20	30	25	100
Cebas	100	140	120	90
Precebas	100	100	100	25
Crías	200	150	175	7
Total	425	425	425	70,40

Considerándose lo planteado por varios autores, entre ellos Guardado (2007), por cada 50 kg de cerdo se obtienen 2,25 kg de excreta, generándose 0,10 m<sup>3</sup> de biogás/día, con una proporción de 1:1-3 de excreta-agua (tomándose una proporción de 1:1) y con un tiempo de retención recomendable de 40 días.

Se determinó el dimensionamiento del biodigestor requerido para la cantidad de animales analizada en la Tabla 2 y el aporte energético de la población animal (Tabla 3).

Como se evidencia en la Tabla 3, la mayor cantidad de biomasa diaria generada, se obtiene en la categoría ceba, representando el 61,1 % de la cantidad de biomasa diaria generada total, este resultado se debe, fundamentalmente, a la cantidad de animales existentes en esta categoría.

Por otro lado, la categoría de ceba es la que más influye en el dimensionamiento del sistema de biodigestión, dado que representa el porcentaje de mayor representatividad para la determinación de los volúmenes del cono base, las paredes laterales (sección cilíndrica) y la cúpula (semiesfera superior), así como del biodigestor, la cámara de fermentación y el tanque de compensación.

Como se representa en la Tabla 4, el rendimiento de biogás a obtener, según la especie, es de 0,044 m<sup>3</sup>/kg (si se

considera la cantidad total de animales se obtienen 18,7 m<sup>3</sup>/kg) y para esa cantidad de animales estabulados es posible obtener un volumen diario de producción de gas total de 34,99 m<sup>3</sup>/día.

Considerándose los valores reflejados en la Tabla 2, se propone la instalación de un biodigestor de cúpula fija de 50 m<sup>3</sup>, las dimensiones del mismo se reflejan en las figuras 2 y 3, así como el esquema general de dicha tecnología (Figura 4) (Guardado, 2007).

En la Tabla 5 se muestra el aporte energético del biogás que se obtendrá con la instalación de la tecnología propuesta en el estudio.

Como se evidencia en las tablas 3 y 4, la instalación de biodigestores en unidades de producción agropecuaria constituye una opción energéticamente viable, a lo cual habría que añadir la contribución a la conservación y cuidado del medioambiente.

Un estimado del costo del proceso constructivo y de instalación del sistema de biodigestión propuesto, sin considerar la mano de obra, se representa en la Tabla 6 donde se relacionan los materiales requeridos para la construcción e instalación de la tecnología.

Tabla 3. Dimensionamiento del biodigestor diseñado en función de la cantidad de animales

Fuente de materia prima	Animal por día	Masa promedio (kg)	Bmd (kg/día)	Vdm (m <sup>3</sup> /día)	Vbiodig (m <sup>3</sup> )	V1 (m <sup>3</sup> )	V2 (m <sup>3</sup> )	V3 (m <sup>3</sup> )	Vcf (m <sup>3</sup> )	Vtc (m <sup>3</sup> )
Sementales	5	130	29,25	0,06	64,00	41,00	8,00	1,00	50,00	14,00
Reproductoras	25	100	112,50	0,22						
Cebas	120	90	486	0,98						
Precebas	100	25	112,50	0,22						
Crías	175	7	55,12	0,11						
Total	425	70,40	795,37	1,60						

Tabla 4. Aporte energético de la población animal

Fuente de materia prima	Animal por día	Masa promedio (kg)	Bmd (kg/día)	Y (m <sup>3</sup> /kg)	G (m <sup>3</sup> /día)
Sementales	5	130	29,25	0,044	1,28
Reproductoras	25	100	112,50		4,95
Cebas	120	90	486		21,38
Precebas	100	25	112,50		4,95
Crías	175	7	55,12		2,42
Total	425	70,4	795,37		34,99

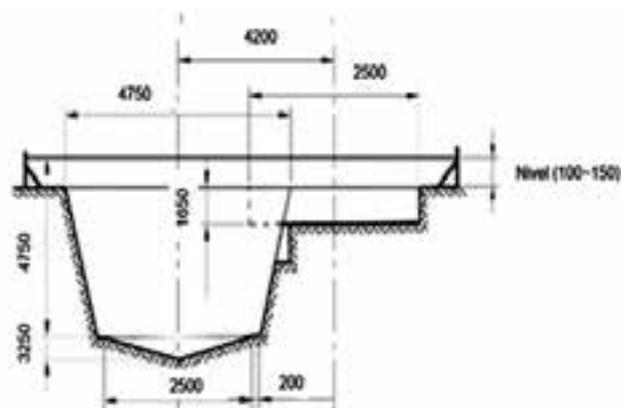
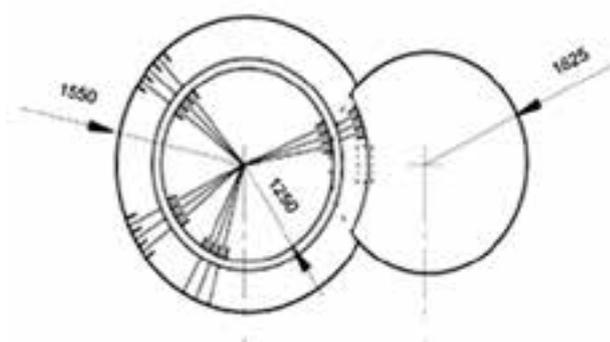


Fig. 2. Dimensionamiento y vistas superior y frontal del biodigestor de cúpula fija (50 m<sup>3</sup>) a instalar en el escenario productivo (Guardado, 2007).

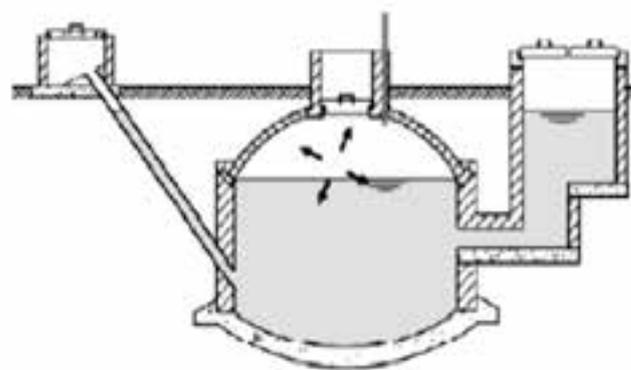
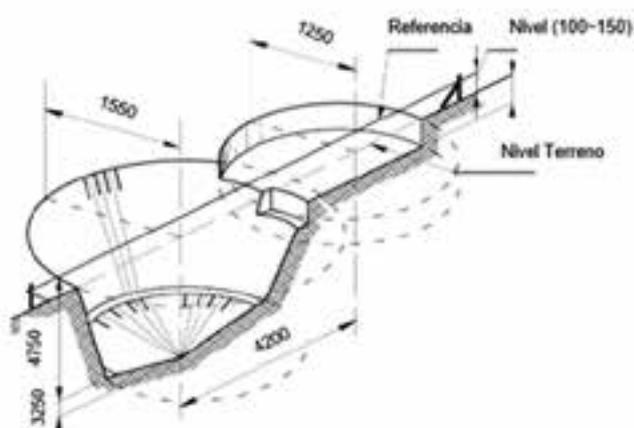


Fig. 3. Dimensionamiento para la excavación del biodigestor de cúpula fija (50 m<sup>3</sup>) a instalar en el escenario productivo (Guardado, 2007).

Fig. 4. Esquema general del biodigestor de cúpula fija (50 m<sup>3</sup>) a instalar en el escenario productivo (Guardado, 2007).

Tabla 5. Aporte energético del biogás a obtener con la instalación propuesta

Parámetros de dimensionamiento	Biodigestor propuesto
$V_{\text{biodig}}$ (m <sup>3</sup> )	64,00
$V_{\text{cf}}$ (m <sup>3</sup> )	50,00
$V_{\text{tc}}$ (m <sup>3</sup> )	14,00
$V_{\text{gas}}$ (m <sup>3</sup> )	8,00
Parámetros energéticos	Biodigestor propuesto
Y (m <sup>3</sup> /kg)	0,044
G (m <sup>3</sup> /día)	34,99
Ahorro energético potencial	Biodigestor propuesto
Energía eléctrica (kWh)	15,91
Gas natural (m <sup>3</sup> )	5,30
Carbón vegetal (kg)	2,65
Madera (kg)	23,86
Gasolina (L)	7,07
Alcohol combustible (L)	10,60
Aceite combustible (L)	6,18

Tabla 6. Listado de materiales y sus costos para la construcción e instalación del biodigestor de cúpula fija de 50 m<sup>3</sup>

Materiales	UM	Cantidad	Precio unitario (CUP/u)	Costo (CUP)
Cemento	Bolsas	150	183	27 450
Arena	m <sup>3</sup>	12	160	1920
Gravilla (38 mm)	m <sup>3</sup>	13	200	2600
Bloque 15 cm	u	895	10	8950
Ladrillos macizos	u	1335	8	10 680
Acero 3/8	kg	340	10	3400
Acero 1/4	kg	43	12,5	537
Puntillas	kg	10	50	500
Alambre de amarrar cabillas	kg	15	25	375
Madera para encofrar	m <sup>3</sup>	1,5	120	180
Excavación	m <sup>3</sup>	100	25	2500
Relleno	m <sup>3</sup>	55	20	1100
Tuberías para captación y conducción de biogás	Accesorios: uniones, codos, limpiador y pegamento PVC, válvulas de cierre (la cantidad varía en función de la distancia hasta las naves)		1 550	1250
Tuberías de 110 mm para suministro de excreta de 5 m de longitud	m	2	300	600
Total				62 042

\*Se considera la tasa de cambio 25 CUP = 1 USD.

La inversión por concepto de materiales para la construcción asciende a un costo de 62 042 CUP. En función del ahorro energético a obtenerse, solo por concepto de gasolina, con una producción diaria de 7,07 L, la cual tiene un precio de 25 CUP, se tendría un ahorro de 176,75 CUP, lo que equivaldría en un año a 64 513,75 CUP, recuperándose la inversión, por concepto de materiales requeridos para la construcción, en su primer año de funcionamiento con una ganancia de 2471, 75 CUP, demostrando la factibilidad económica de la propuesta.

Resulta válido señalar que el correcto dimensionamiento de este tipo de tecnologías propicia el aprovechamiento máximo de los desechos obtenidos en los escenarios productivos.

#### IV. Conclusiones

Se realizó el diseño de un biodigestor de cúpula fija adecuado para la granja El Guayabal, considerándose para ello la cantidad de animales (porcinos), potencial a establecer en la misma, el movimiento de rebaño concebido por la dirección del área y la cantidad de biomasa diaria generada.

A pesar de los costos elevados por concepto de materiales para este tipo de tecnología (biodigestor de cúpula fija) se demostró el ahorro energético, la preservación del medioambiente y la disponibilidad local de los materiales requeridos, aspecto que no limita la ejecución de la obra

ingenieril. Durante el primer año de funcionamiento del biodigestor se recuperará la inversión, obteniéndose una ganancia de 2471, 75 CUP, elemento que determina la factibilidad económica del proyecto.

#### V. Referencias bibliográficas

- Bansal, V., Tumwesige, V. y Smith, J. U. (2017). Water for small-scale biogas digesters in sub-Saharan Africa. *GCB Bioenergy*. 9(2), 339-357.
- Biogas Association. (2015). *Municipal guide to biogas*. Ottawa, Canada: Biogas Association.
- Flotats, X., Campos, E., Palatsi, J., Bonmatí, X. (2001). Digestión anaerobia de purines de cerdo y codigestión con residuos de la industria alimentaria. *Porci; Monografías de actualidad*, 65, pp 51-65.
- Frankiewicz, T. (2015). *People's Republic of China Urban Municipal Waste and Wastewater Program* (p. 16). Proceeding of Technology, Process and Evaluation Best Practices for Utilizing Organic and Kitchen Waste from the Municipal Solid Waste Stream Workshop. Global Methane Initiative. Ningbo, China.
- Grundey, K. (1982). *Tratamiento de los residuos agrícolas y ganaderos* (pp. 278-280). Ediciones GEA.
- Guardado Chacón J. A. (2006). *Manual del Biogás*. Editorial Cubasolar
- Guardado Chacón J. A. (2007). *Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas*. Editorial Cubasolar, ISBN 959-7113-33-3

- Hernández Jiménez, A., Bosch Infante, D., Pérez Jiménez, J. M., Castro Speck, N. (2015). *Clasificación de los suelos de Cuba* (p. 93). Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas.
- Parra D., Botero, M., Botero, J. (2019). Biomasa residual pecuaria: revisión sobre la digestión anaerobia como método de producción de energía y otros subproductos, *Revista UIS Ingeniería* 18(1), 149-160.
- Priddle, R. (1999). Energía y Desarrollo Sostenible. *Boletín* 41(1) 2-6. [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjmcCw44D8AhXzSZA-BHXdRB2wQFnoECBMQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.iaea.org%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2F41104080206\\_es.pdf&usg=AOvVaw2rRDkemS6W-Fflf4Z-DFor](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjmcCw44D8AhXzSZA-BHXdRB2wQFnoECBMQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.iaea.org%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2F41104080206_es.pdf&usg=AOvVaw2rRDkemS6W-Fflf4Z-DFor)
- Rahayu, A. S., Karsiwulan, D., Yuwono, H., Trisnawati, I., Mulyasari, S., Rahardjo, S., Hokermin, S. y Paramita, V. (2015). *Handbook Pome-to-Biogas. Project development in Indonesia*. Winrock international. <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjWo72H1YH8AhV9QzABHbg-PA2MQFnoECAwQAQ&url=https%3A%2F%2Fwinrock.org%2Fwp-content%2Fuploads%2F2016%2F05%2FCIRCLE-Handbook-2nd-Edition-EN-25-Aug-2015-MASTER-revo2-final-new02-edited.pdf&usg=AOvVaw3soGeD9x6P-so57obyE7RcQ>
- Santos Abreu, I., Medina Morales, N., Machado Muro, Y. y Martín Santos, T. M (2011). *La educación agropecuaria en la escuela cubana actual*. Editorial CEEA.
- Sosa Cáceres, R. (22-26 de mayo de 2017) *Indicadores ambientales de la producción porcina y ganadera*. VII Seminario Internacional de Porcicultura Tropical. Instituto de Investigaciones Porcinas. La Habana, Cuba.
- Suárez Hernández, J., Sosa Cáceres, R., Martínez Labrada, Y., Curbelo, A., Figueredo Rodríguez, T., Cepero Casas, L. (2018). Evaluación del potencial de producción del biogás en Cuba. *Pastos y Forrajes*, 41(2), 85-92.
- Zheng, Y.H., Wei, J.G. Li, Feng, S.F., Li, Z.F., Jiang, G.M., Lucas, M, Wu, M., Ning, T.Y. (2012). Anaerobic fermentation technology increases biomass energy use efficiency in crop residue utilization and biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 4588-4596. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.061>

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

**Contribución de los autores:** Yanoy Morejón Mesa, conceptualización, investigación, metodología, supervisión y redacción-revisión y edición; Vilma Moreno Melo, curación de datos, metodología y redacción-borrador original; Jenifer Álvarez Lima, análisis formal, validación y redacción-borrador original.

Recibido: 24 de octubre de 2022

Aprobado: 17 de noviembre de 2022

# 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 técnico-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 recopiló 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 recopiló 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:

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

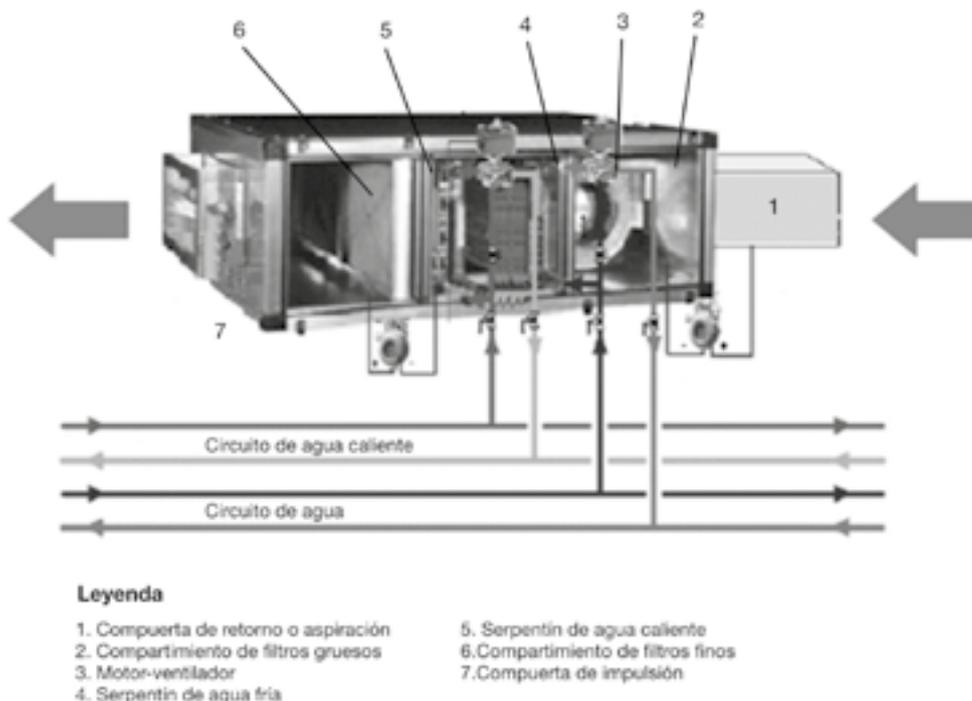


Fig. 1. Manejadoras de aire.

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  $F_{\beta}$ , 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**

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

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.

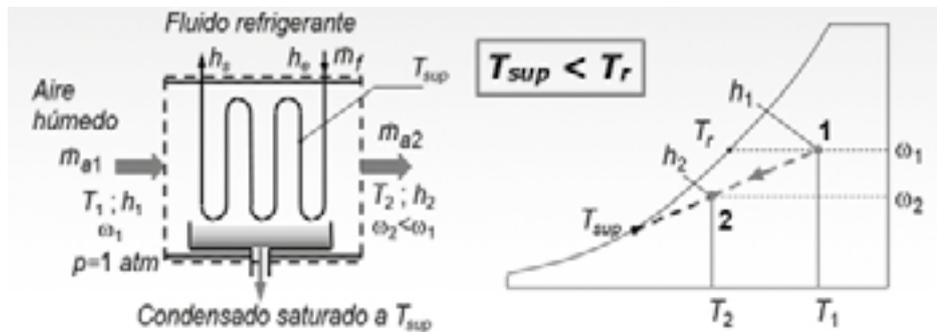


Fig. 2. Proceso de enfriamiento con deshumidificación.

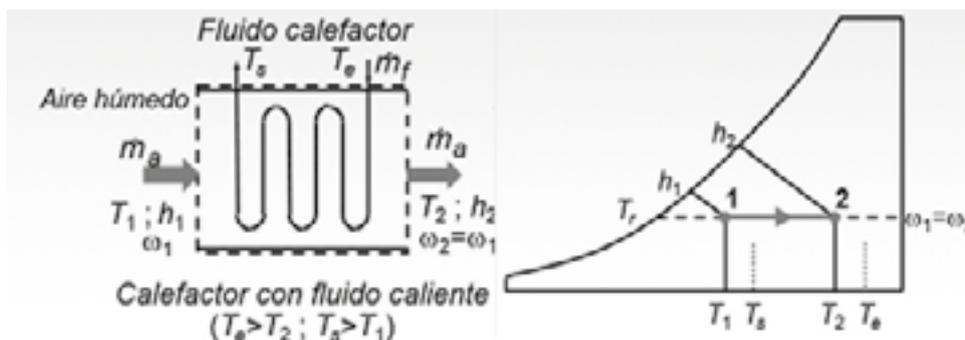


Fig. 3. Proceso de calentamiento de aire.

### 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),  $\rho$  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
- Inclinción 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 (m<sup>2</sup>),  $F_r$  tan el factor de

eficiencia óptica del colector o factor de ganancia,  $R$  la radiación solar media horizontal (kWh/m<sup>2</sup> 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

Primeramente 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 (m<sup>2</sup>) 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 (m<sup>2</sup>) y  $A$  la suma total de las áreas de los captadores solares (m<sup>2</sup>).

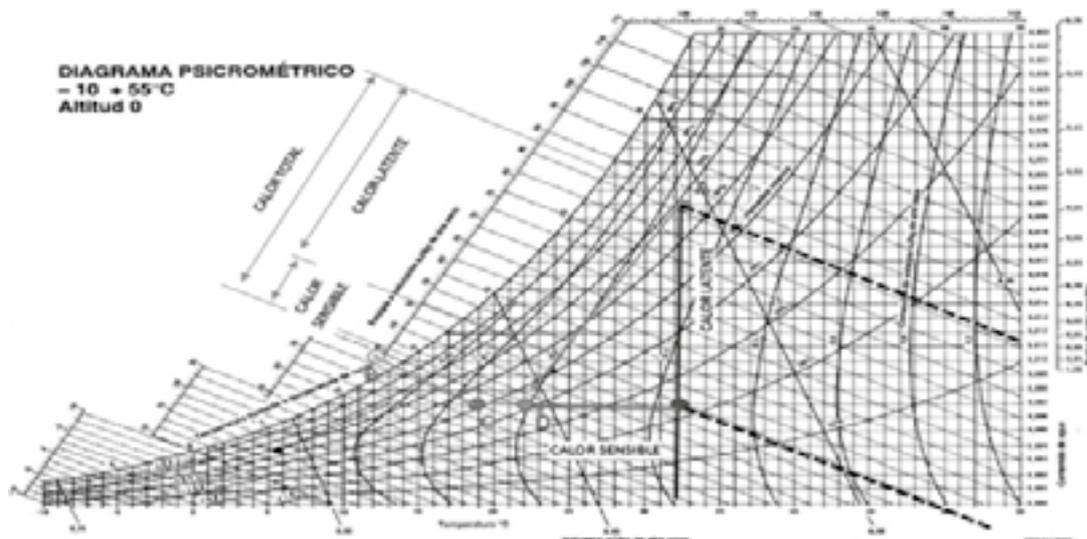


Fig. 4. Diagrama psicrométrico del proceso de climatización.

### 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:

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

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

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

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

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

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

Donde  $E_p$  es la energía perdida en el colector (kWh/mes),  $S_c$  la superficie del colector ( $m^2$ ),  $F_r * U_L$  la pendiente de la curva característica del colector o coeficiente global de pérdidas del colector ( $kW/m^2K$ ),  $\Delta t$  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:

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

### 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
<b>Costos operativos en CUP (MP)</b>		
Costos anuales de operación y mantenimiento en CUP (MP)		1604
Costo de generación en CUP (MP)	64 136,33	1 603 408,37
<b>Vida útil de la instalación</b>		<b>25 años</b>
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).

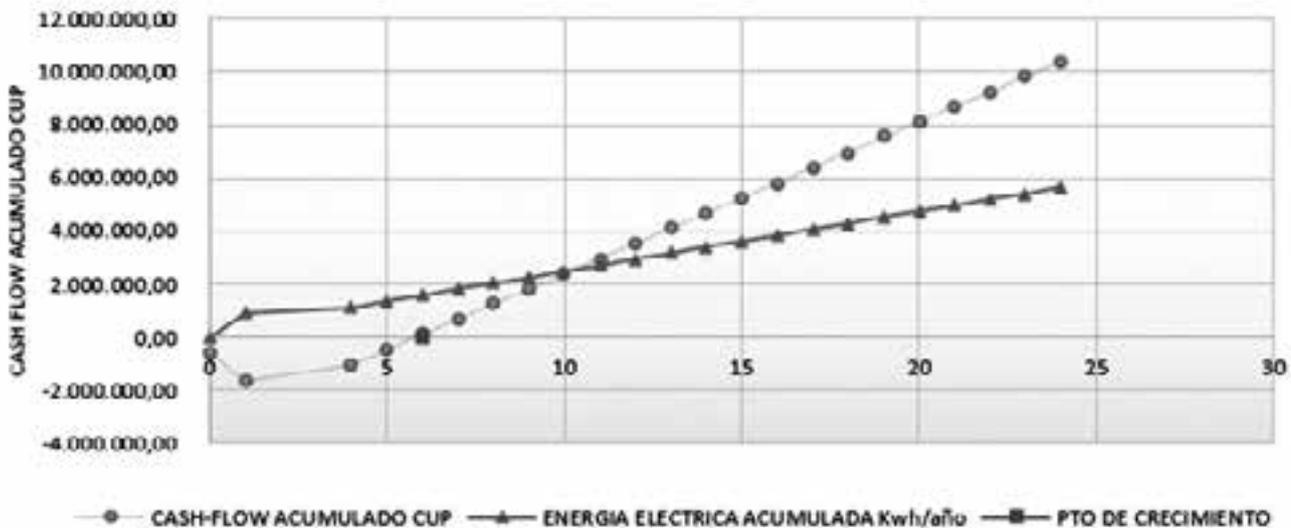


Fig. 7. Análisis de factibilidad del proyecto.

### Impacto ambiental

El estudio logró una reducción importante de las emisiones de CO<sub>2</sub>, alcanzando el valor de 103 t de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>.

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 CO<sub>2</sub>.

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

Alemany 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&usq=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](http://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-t%C3%A9rmicas-predimensionado-y-dimensionado-grupo-formadores-andaluc%C3%ADa.html>

Minem (2021). *Ministerio de Energía y Minas. Energías Renovables y Eficiencia Energética, Políticas y Lineamientos*. [www.minem.gob.cu](http://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

# POTENCIAL DE IMPLEMENTACIÓN DE MICRORREDES ENERGÉTICAS EN CUBA

Por Dr. C. **Roberto Sosa Cáceres\***, M. Sc. **Enrique Viant Garrido\*\***, Ing. **Ariel Rodríguez Rosales \*\*\***, Dr. C. **Alfredo Curbelo Alonso\*\*\*\*** y Lic. **Manuel Álvarez González\*\*\*\*\***

Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía (Cubaenergía), La Habana, Cuba.

\* <https://orcid.org/0000-0003-4856-2443>

E-mail: [rsosa@cubaenergia.cu](mailto:rsosa@cubaenergia.cu)

\*\* <https://orcid.org/0009-0008-8936-4965>

E-mail: [eviant@cubaenergia.cu](mailto:eviant@cubaenergia.cu)

\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-9306-5860>

E-mail: [rosales@cubaenergia.cu](mailto:rosales@cubaenergia.cu)

\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0003-2672-6881>

E-mail: [acurbelo@cubaenergia.cu](mailto:acurbelo@cubaenergia.cu)

\*\*\*\*\*Autor independiente

## Resumen

En términos de gestión, transmisión y uso de la energía está ocurriendo un cambio de paradigma a nivel internacional donde se integran tecnologías de la información y la comunicación en la generación, transmisión, distribución y consumo de este recurso a todos los niveles. El problema a resolver, en el caso Cuba, es contribuir con una mayor eficiencia energética, independencia y seguridad del servicio en el Sistema Electroenergético Nacional (SEN) creando su estructura nacional a través de microrredes.

El estudio evalúa las oportunidades de introducción de microrredes energéticas con fuentes renovables de energía (FRE) en las condiciones de Cuba; identifica las potenciales para la proyección de esta tecnología en comunidades aisladas del SEN en las cinco provincias orientales del país a través de la caracterización de estas zonas y la aplicación de una metodología que determina la factibilidad de un proyecto de microrred en estos territorios.

*Palabras clave: microrredes energéticas, potencial de implementación, energías renovables.*

---

## POTENTIAL FOR IMPLEMENTATION OF MICRO ENERGY NETWORKS IN CUBA

### Abstract

In terms of energy management, transmission and use, a paradigm shift is taking place at the international level where information and communication technologies are integrated into the generation, transmission, distribution and consumption of this resource at all levels. The problem to be solved, in the case of Cuba, is to contribute to greater energy efficiency, independence and security of service in the National Electro-Energy System (SEN) by creating its national structure through microgrids.

The study evaluates the opportunities for the introduction of energy microgrids with renewable energy sources (RES) in Cuban conditions; it identifies the potentials for the projection of this technology in isolated communities of the SEN in the five eastern provinces of the country through the characterisation of these areas and the application of a methodology that determines the feasibility of a microgrid project in these territories.

*Keywords: energy microgrids, implementation potential, renewable energies.*

---

## I. Introducción

En términos de gestión, transmisión y uso de la energía está ocurriendo un cambio de paradigma a nivel internacional donde se integran tecnologías de la información y la comunicación en la generación, transmisión, distribución y consumo de este recurso a todos los niveles.

En la actualidad, están apareciendo nuevos conceptos que integran el suministro de electricidad, calor y agua para ofrecer una gestión completa de la energía y soluciones de servicio novedosas. Los vehículos eléctricos, además de los bancos de baterías utilizados como dispositivos de almacenamiento de la electricidad, completan la visión de un internet de la energía. El problema a resolver, en el caso Cuba, es contribuir con una mayor eficiencia energética, independencia y seguridad del servicio en el Sistema Electroenergético Nacional (SEN) creando su estructura nacional a través de microrredes que comprendan, no solo las fuentes renovables de energía (FRE), sino también las fuentes convencionales.

El estudio tiene por objetivo general: evaluar las oportunidades de introducción de microrredes en las condiciones de Cuba. Objetivo específico la identificación de potenciales en las cinco provincias orientales.

Como resultado se obtuvo un censo actualizado de las comunidades aisladas del SEN con datos demográficos, técnicos y de fuentes renovables de energía, entre otros. Esta base de datos servirá para implementar proyectos de mejoramiento del servicio eléctrico con FRE sin aumentar el consumo de combustibles fósiles, ni la contaminación ambiental.

## II. Materiales y métodos

Expertos en proyectos de energías renovables, elaboraron la encuesta *Ficha de comunidad no conectada a la red eléctrica nacional*, la cual se aplicó en las cinco provincias seleccionadas para este trabajo: Las Tunas, Holguín, Granma, Santiago de Cuba y Guantánamo.

Ficha de comunidad no conectada a la red eléctrica nacional

### a) Identificación:

- Nombre de la comunidad:
- Consejo Popular:
- Municipio:
- Provincia:
- Coordenadas geográficas:

### b) Caracterización:

- Número de viviendas:
- Número de habitantes:

Actividades económicas predominantes: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

### c) Acceso a la electricidad:

- Horas diarias con servicio eléctrico: \_\_\_\_\_
- Fuente de generación eléctrica:
  - Grupo electrógeno diésel:  
Sí: \_\_\_ potencia (kW): \_\_\_\_\_ No: \_\_\_
  - Sistema solar fotovoltaico (SSFV):  
Sí: \_\_\_ No: \_\_\_
  - SSFV individual por vivienda: \_\_\_ potencia (kW): \_\_\_\_\_
  - Centralizado: \_\_\_ potencia (kW): \_\_\_\_\_
  - Hidroenergía: \_\_\_ potencia (kW): \_\_\_\_\_
  - Otro:

### d) Posibilidades de conexión a la red eléctrica:

- Corto plazo (en 1 o 2 años): Sí: \_\_\_ No: \_\_\_
- Mediano plazo (de 3 a 6 años): Sí: \_\_\_ No: \_\_\_
- Largo plazo (más de 6 años): Sí: \_\_\_ No: \_\_\_

### e) Sobre la Red de Distribución Interna (RDI) de electricidad:

- Existe Red de Distribución Interna (RDI):  
Sí: \_\_\_ No: \_\_\_
- Estado de la RDI:  
Bueno \_\_\_ Regular \_\_\_ Malo \_\_\_  
Falta de mantenimiento \_\_\_
- Existencia de metros contadores de electricidad:  
Sí: \_\_\_ No: \_\_\_
- Existencia de bombas de agua para pozos.  
Sí: \_\_\_ No: \_\_\_
- Tipo (si hubiera): \_\_\_\_\_
- Distancia de la RDI al Sistema Electroenergético Nacional (SEN): \_\_\_\_\_ km

**f) Demanda de energía eléctrica:**

- Máxima demanda de energía eléctrica: \_\_\_\_\_ kW
- Consumo de energía eléctrica: \_\_\_\_\_ kW/h/mes; \_\_\_\_\_ kW/h/día
- Consumo de diésel del grupo electrógeno: \_\_\_\_\_ L/mes; \_\_\_\_\_ L/día

**g) Posibles fuentes renovables de energía para la electrificación:**

- Arroyos de montaña: \_\_\_\_
- Biomasa forestal: \_\_\_\_
- Biogás (por la cría de ganado en cuarterones): \_\_\_\_
- Residuos agroindustriales: \_\_\_\_

**h) Superficie disponible para sistemas solares fotovoltaicos (SSFV) en terrenos de no interés para la agricultura o techos: \_\_\_\_\_ m<sup>2</sup>**

**i) Fecha de elaboración: \_\_\_\_\_**

**j) Elaborada por** (nombre y apellidos, institución, teléfono, e-mail):

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**III. Resultados**

*Resultado 1:* Caracterización de las comunidades aisladas del Sistema Electroenergético Nacional.

Tabla 1. Caracterización de las comunidades aisladas del Sistema Electroenergético Nacional en la provincia Holguín

No.	Municipio	SSFV	Grupo electrógeno	Hidroeléctrica	Sin conexión	Comunidades aisladas
1	Gibara	15				15
2	Freyre	44	17			61
3	Banes	20	20	1		41
4	Antilla	17				17
5	Báguano	27	6		1	34
6	Holguín	10	1			11
7	Calixto García	34				34
8	Cacocum	10	11			21
9	Urbano Noris	30	2			32

10	Cueto	22	1		23
11	Mayarí	28	12	2	42
12	Frank País	15	12	1	28
13	Sagua de Tánamo	41	16		57
14	Moa	2	2	1	5
Total		315	100	5	421

\*SSFV: Sistema solar fotovoltaico

Según reporta el Centro de Información y Gestión Tecnológica (Ciget) de Holguín, existen inconvenientes en la obtención de los datos de la investigación, y a nuestro criterio, en lo adelante será aún más complejo dada la gran cantidad de comunidades identificadas, sobre todo las conectadas a SSFV, que incluyen varias viviendas aisladas en zonas de difícil acceso. Este criterio se basa en la información brindada a esta investigación por los organismos antes mencionados, lo cual indica que se deben buscar otras alternativas.

Igualmente, una posible vía para obtener información sobre la cantidad de habitantes, actividad económica que realizan, consejos populares al que pertenecen y la superficie disponible para SSFV, son los supervisores de los grupos electrógenos en los municipios.

Tabla 2. Caracterización de las comunidades aisladas del Sistema Electroenergético Nacional en la provincia Santiago de Cuba

No.	Municipio	Comunidades aisladas
1	Santiago de Cuba	17
2	Songo La Maya	7
3	San Luis	33
4	Segundo Frente	9
5	Palma Soriano	5
6	Contramaestre	1
7	Guama	15
8	Tercer Frente	3
Total		90

Tabla 3. Caracterización de las comunidades aisladas del Sistema Electroenergético Nacional en la provincia Guantánamo

No.	Municipio	Comunidades aisladas
1	Manuel Tâmes	29
2	Baracoa	14
3	El Salvador	21
4	Niceto Pérez	4
5	Imías	13
6	San Antonio del Sur	14
7	Maisí	8
Total		103

*Resultado 2:* Se elaboró una metodología para determinar si en una comunidad aislada resulta factible proyectar una microrred.

### 1. Identificación de la Comunidad

1.1. Necesidad social de implementar una microrred en la comunidad Normalmente son los investigadores, especialistas, dirigentes o funcionarios nacionales, provinciales o locales los que llevan la iniciativa de crear, en determinada localidad, una microrred energética. Ellos conocen las ventajas técnicas, económicas y ambientales de estos sistemas, disponen de mayor acceso a la información sobre los lugares donde el servicio eléctrico o energético pudiera mejorarse y sienten la necesidad de implementar proyectos que mejoren significativamente las condiciones de vida en estas comunidades.

Otro aspecto netamente profesional y legítimo, es que, al tiempo que se mejoran las condiciones de vida, existe la necesidad de probar tecnologías modernas relacionadas con la automatización e informatización de los procesos energéticos y sistemas de fuentes renovables de energía. Esto resulta importante para el desarrollo de habilidades y experiencias en esta temática, que a todas luces se generará en los próximos años.

1.2. Presentación de la idea del proyecto y aceptación de los habitantes para implementar y mantener una microrred

Todo lo anteriormente expresado, resulta suficiente para establecer una microrred, sin embargo, la realidad ha demostrado que si los habitantes no desean un proyecto de FRE o de microrred electroenergética, serán en vano los recursos empleados. Por lo tanto, desde las primeras acciones es deber involucrar activamente a los líderes de la comunidad para que se conviertan en actores de ese cambio.

### 2. Toma de los datos generales de la comunidad

#### 2.1. Censar la cantidad de viviendas

La toma de datos deberá realizarse en forma de planilla y acorde al Anexo 1 para obtener una mejor organización en los resultados.

El censo para obtener la cantidad de viviendas en la comunidad deberá ser lo más actualizado posible, incluyendo la planificación de su crecimiento a mediano plazo. Hay que tener en cuenta que el diseño de la microrred, aunque se planifique con al menos un 20 % de reserva en la demanda eléctrica o energética, tampoco podría ser superior a un crecimiento ilimitado. Hasta el momento en Cuba, las viviendas en comunidades aisladas varían de 12 hasta 90 viviendas.

El número de casas, instalaciones sociales, económicas o culturales, tendrá una relación directa con los gastos en infraestructura como postes, líneas eléctricas, aisladores, desconectivos, transformadores, etc.

2.2. Censar la cantidad de personas por vivienda y en la comunidad

Durante la ejecución de otros proyectos se han realizado estudios sobre la cantidad de personas en las zonas rurales cubanas, donde habitan cuatros personas por vivienda.

Aunque se asume que la cifra puede no haber variado, se tendrá en cuenta la actualización de este dato por su asociación al consumo energético-doméstico.

3. Determinar la demanda eléctrica o energética de la comunidad

3.1. Censar la cantidad de equipos electrodomésticos y la demanda energética por vivienda

Censar la cantidad de equipos electrodomésticos, su potencia eléctrica y sus horarios de uso, permitirá conocer la potencia eléctrica instalada y sus características, necesarias para determinar la demanda eléctrica y sus horarios correspondientes. De igual forma, se consideran en el estudio, cuál es el uso de la energía: si es para cocinar, alumbrarse, usar la ventilación, el aire acondicionado, o para calentar agua.

3.2. Censar el equipamiento electroenergético instalado en objetos sociales o económicos de la comunidad

El objetivo de este acápite es bastante similar al 2.1. Se tendrá en cuenta todo el equipamiento, incluyendo los grupos electrógenos, el tipo y la cantidad de combustible que utilizan, su eficiencia y los horarios de trabajo.

4. Caracterización de la red existente en la comunidad y las acometidas eléctricas en las viviendas y demás objetos sociales y económicos que la componen

#### 4.1. Estado técnico de la red local

Por lo general, las comunidades aisladas tienen algún tipo de red rústica, hecha con materiales de uso e instalados en mal estado, lo que provoca caídas de tensión y pérdida de la calidad en el servicio eléctrico brindado a los últimos usuarios de la red, de modo que casi nunca se cumplen las normativas eléctricas. En este sentido, se enumeran los cables que no tienen el diámetro necesario, así como postes y aisladores.

4.2. Distancia de la red local al Sistema Eléctrico Nacional

Desde el punto de vista eléctrico-ingenieril, las distancias son claves para calcular diámetros de conductores, apoyos, postes, bajantes y otros elementos.

También hay que tener en cuenta la distancia más cercana al SEN y las perspectivas de conexión al mismo para planificaciones de desarrollo futuro.

4.3. Caracterización de la infraestructura local, caminos y accesos

Para el cálculo de los gastos en la proyección de la nueva microrred, se tendrán en cuenta factores geográficos para desarrollar la infraestructura local como caminos, accesos, tipo de suelo, fuentes de agua, etc. Sin estos datos no se podrán realizar los proyectos para emplazar bases para los equipos de FRE, postes de transmisión de energía eléctrica, etc.

5. Identificación de las fuentes renovables de energía locales y sus potenciales energéticos

Uno de los pasos más importantes será identificar los potenciales existentes de FRE. Sin un cálculo probado de estos potenciales, no es válido la implementación de una microrred. Las FRE más comunes suelen ser:

- Solar fotovoltaica (SFV): En Cuba, la radiación solar alcanza a toda la superficie nacional con una alta intensidad, una media de 5 kW/m<sup>2</sup> (Bérriz y Álvarez, 2016).
- Solar térmica: El uso de esta tecnología y su desarrollo en nuestro país con la puesta en marcha de algunas industrias de fabricación, permiten sin dudas utilizarla para calentar el agua. Es común, a pesar del verano, el uso de agua tibia o caliente para el aseo personal. Otra de las aplicaciones importantes es la del secado de productos agrícolas, tanto para la alimentación humana como animal.
- Biomasa: Entre las biomásas podemos citar los residuos forestales y el aserrín que sirven para generar energía a través de la gasificación. Aquí se incluyen otros residuos agroforestales como la cascarilla de arroz, tecnología que ha despertado interés a partir de experiencias exitosas como la de la planta de gasificación del molino secador de arroz de Los Palacios en Pinar del Rio.
- Otra de las biomásas son los residuos o aguas residuales orgánicas provenientes de la industria agroalimentaria, como son las aguas residuales de las ganaderías porcina, vacuna y avícola. Como se puede apreciar en las tablas 4 y 5 los volúmenes de residuos y potenciales energéticos no son nada despreciables.

Tabla 4. Volumen de excreta por pesos vivos y especie

Especie	Cantidad diaria de estiércol		Orina	Material de fermentación (%)
	Peso aproximado (kg)	Peso vivo (%)	Peso vivo (%)	SVT
Cerdos	2 a 2,5	2,5	3	12
Vacunos	8	5	4	13
Pollos	0,08	4,5	-	16
Humanos	0,5	1	2	15

\*SVT: Sólidos Volátiles Totales

Tabla 5. Degradación de la materia orgánica en procesos anaerobios con la consecuente formación de biogás (Curbelo et al., 2018; Arispe et al., 1992)

Sustrato	Rango de producción de biogás de SVT (L/ kg)	Promedio de producción de biogás de SVT (L/ kg)
Excreta de cerdo	340-550	450
Excreta de vacuno	150-350	250
Excreta de pollo	310-620	460

\*SVT: Sólidos Volátiles Totales

Teniendo en cuenta las tendencias internacionales sobre el uso de este tipo de residuos, no habría que desechar las excretas humanas, que aportan tanto biogás y fertilizante orgánico como las de porcino.

- Energía eólica: Depende de las condiciones locales de velocidad del viento. No obstante, es necesario puntualizar que los aerogeneradores modernos permiten ser instalados en lugares con menos velocidad del viento. En este contexto, se tuvieron en cuenta las pequeñas máquinas, aerogeneradores de hasta 200 kW, que son las más utilizadas en regiones aisladas (Moreno et al., 2012).
- Hidroenergía: Cuba no dispone de suficientes ríos caudalosos u otros recursos hídricos para generar electricidad, además de considerar los periodos de seca. Sin embargo, muchas comunidades en zonas aisladas han sido beneficiadas con la instalación de microestaciones hidráulicas en pequeños arroyuelos montañosos. De este modo, de existir este recurso, se tendrá en cuenta como FRE posible a emplear.
- Uso de baterías: Para garantizar un servicio estable y de calidad durante las 24 horas, la microrred podría incluir el uso de baterías como almacenamiento de electricidad. Existen varios tipos de baterías como las de plomo-ácido, las de hidróxido de potasio (KOH) y otras más recientes, aunque muy caras, como las de litio.



Fig.1. Demanda eléctrica de la comunidad Guasasa, provincia de Matanzas (Rodríguez, 2019).

5.1. Cálculo del potencial de energía de cada una de las FRE identificadas

Una vez identificadas las FRE disponibles en la localidad, se procede a calcular el potencial energético en cada una de ellas. Estos cálculos deberán ser realizados teniendo en cuenta la potencia de generación y los horarios de funcionamiento o disponibilidad.

6. Secuencia de entrada y salida de las diferentes fuentes de generación a la microrred

El orden o secuencia de entrada y salida de las diferentes fuentes de generación a la microrred, dependerá del costo del kW/h de cada una y de los horarios de disponibilidad de generación. Este aspecto tiene un importante valor de uso para la programación de los sistemas de control automático de las microrredes. Para ello, tomamos como ejemplo el Proyecto Guasasa.

Se prevé que el régimen de operación de la microrred sea el siguiente:

- En el horario de 10 p.m. a 6 a.m. la electricidad se entregará por un banco de baterías.
- En el horario diurno se podrá compensar el déficit de generación puntual hasta disminuir su carga al 70 % de su capacidad nominal.
- Este banco se cargará a través de las fuentes renovables de generación de la microrred durante el día y, en caso de necesidad, con este fin se utilizará el grupo diésel.
- La planta de gasificación de biomasa operará durante 8 horas diarias en el turno de 6 a.m. a las 2:00 p.m.
- La planta fotovoltaica generará según el horario de radiación solar que varía al cambiar las estaciones del año.
- El aerogenerador entregará directamente a la microrred de acuerdo a la disponibilidad de viento en el área.
- El grupo diesel existente operará de manera puntual para cubrir el déficit de generación eléctrica de las otras fuentes.

El uso del banco de baterías en el horario nocturno permitirá simplificar la operación de la planta con solo dos turnos de operación de 8 horas cada uno y su capacidad de almacenamiento se corresponde con el consumo de electricidad entre las 10 p.m. y las 6 a.m., que se estima en 109 kWh.

6.1. Cálculo del costo de generación de la energía eléctrica a producir por cada FRE

A continuación se calcula el costo de generación de la energía eléctrica a producir por cada FRE. Para esto se tendrán en cuenta los precios locales de los equipamientos, tecnologías, obras inducidas y cualquier otro gasto asociado a la instalación, puesta en marcha y operación del sistema.

6.2 Cálculos del costo general de la microrred

El costo general de la microrred está integrado por los costos del equipamiento, la transportación, los de opera-

ción y mantenimiento y piezas de repuesto de toda la tecnología. Se incluirán los costos de obras inducidas.

7. Diseño de la microrred. Selección del equipamiento  
Prácticamente, cada microrred es diferente atendiendo a sus condiciones, potencialidades de FRE y otros factores. El equipamiento seleccionado deberá ser el de mejor calidad dentro de los precios posibles. Se tendrán en cuenta las condiciones de tropicalización y las normas eléctricas cubanas vigentes como la NC 365: 2011 Tensiones de normalizadas y la NC 800-1: 2011.

Por otra parte, existe una gran variedad de equipamientos y tecnologías, por lo que la selección deberá ser realizada por personal técnico especializado con experiencias en proyectos anteriores.

7.1. Características eléctricas del equipamiento

Se deberán tener en cuenta las características de nuestras redes eléctricas, 110 V y 220 V AC a 60 Hz para sistemas monofásicos. Para sistemas trifásicos los voltajes podrían ser de 220 V, 440 V y 13,8 kV.

Otro aspecto para el análisis será el índice de protección (IP) de los equipos que a su vez se verá más o menos favorecido en dependencia de las condiciones ambientales del lugar y del país, como por ejemplo la humedad relativa  $\geq 90\%$ , los niveles de polvo, los máximos de temperatura, etc.

7.2. Condiciones meteorológicas y ambientales para emplazar el equipamiento

Para emplazar el equipamiento se tendrán en cuenta las condiciones locales como velocidad del viento, salinidad y radiación solar.

8. Identificación y gestión de fondos financieros disponibles para la construcción, operación y mantenimiento de la microrred

Por las características de este tipo de proyectos, que son generalmente de protección al medioambiente, sostenibilidad alimentaria y mejoramiento de las condiciones sociales, resultan relativamente elegibles por los organismos y programas internacionales de las Naciones Unidas.

Aunque es frecuente que se comience la gestión de estas instalaciones con los fondos identificados, también podría ser que, a pesar de existir el interés comunitario, no se disponga de dichos recursos. En ese caso, y sobre todo cuando prevalezca la necesidad social y económica, se deberá insistir en la búsqueda de los fondos, conociendo que, con una mayor independencia económica y de desarrollo municipal, es posible solicitar la planificación de los mismos.

9. Sostenibilidad de la microrred

Para garantizar la sostenibilidad de la microrred es imprescindible:

- El deseo unánime de la instalación y funcionamiento de una microrred para satisfacer las necesidades económicas y sociales de los pobladores.
- Una correcta y periódica capacitación del personal a cargo.

- La planificación de los fondos necesarios para el mantenimiento y operación.
- La selección de un responsable que solucione los problemas técnicos y organizativos que pudiera ocurrir y atienda con diligencia su funcionamiento.

#### 10. Correr los datos colectados a través del programa HOMER

Normalmente, los expertos utilizan el Modelo de Optimización HOMER (Homer Energy, LLC, 2020) para calcular todas las posibilidades técnicas de las microrredes a partir de los datos disponibles, sin embargo, los aspectos sociales o de aceptación no se analizan la mayoría de las veces.

De realizar un buen trabajo en la selección del personal y del lugar, tomando en consideración los aspectos culturales y socioeconómicos de este último, dependerá el éxito o fracaso del proyecto, aspecto que diferencia a esta metodología de otras.

#### 11. Caracterización social de la comunidad, grado cultural y de preparación técnica de los habitantes

Resulta esencial la preparación del personal encargado de operar y mantener los equipos y la tecnología; como norma, estos trabajos deberán ser asumidos por habitantes cercanos.

El grado de escolarización en Cuba es alto, también el de preparación media y profesional, Por lo tanto no deberá ser difícil encontrar el personal adecuado para estas tareas. Sin embargo, algunas operaciones muy específicas de control o automatización, al inicio del proyecto, deberán ejecutarse por personal calificado, aspecto necesario en la selección del equipamiento, partiendo de la inexistencia en el país de un abastecimiento de piezas y partes acorde a la demanda.

Como principio se deberá tener el concepto siguiente: Mientras más robusta, sencilla y fácil de operar sea la tecnología, mejor.

#### 12. Descripción de las particularidades de género y grupos etarios en la comunidad

Otros de los aspectos a tener en cuenta en casi todos los proyectos de desarrollo social, técnico o energético son los relacionados al género y este. Las especificidades de la comunidad en cuanto a género y grupos etarios son importantes.

El empoderamiento de las mujeres hacia estas tecnologías resulta imprescindible, pues sin su comprensión, apoyo y participación directa no se tendrá el éxito esperado. Hoy día las mujeres son mayoría en muchas actividades, incluyendo la administración o dirección de comunidades, y su influencia en cualquier actividad o sector de la vida cotidiana es decisiva. Por lo tanto, se deberá censar la cantidad de hombres y mujeres, su preparación cultural y la disposición de las féminas para ocupar puestos de trabajo en la microrred.

Con igual rigor hay que tomar los datos poblacionales y tener en cuenta la cantidad de jóvenes que podrían garantizar el funcionamiento estable y sostenible de las instalaciones.

#### 13. Aspectos ambientales de la microrred

Por ningún motivo la implementación de una microrred deberá provocar problemas de contaminación o daño ambiental. Por el contrario, una de sus ventajas más significativas es que resolverá las necesidades energéticas y sociales sin talar bosques, reducir biodiversidad, ni emitir sustancias ni ruidos perturbadores al ambiente. Desde su concepción se enfrentará a las negativas de las organizaciones regulatorias locales o nacionales.

##### 13.1. Impacto ambiental. CO<sub>2</sub> dejado de emitir

Uno de las características más positivas de estos proyectos será el impacto ambiental y el CO<sub>2</sub> dejado de emitir por la generación de energía mediante FRE y por la sustitución de la energía convencional, dígame combustibles fósiles como el diésel o los kWh dejados de consumir del SEN.

##### 14. Impacto social en la comunidad

El impacto social en la comunidad deberá ser igualmente positivo, lo que estará claramente visible por el incremento de puestos de trabajo de calidad, donde se incluyen a mujeres y jóvenes. Es de vital importancia garantizar la retención de estos últimos como garantía de la sostenibilidad de la microrred.

##### 15. Evaluación económica

Para conocer la posibilidad de implementar una microrred se deberá realizar una evaluación económica, donde a través de los cálculos se llegue a la conclusión de que el costo de la energía será menor o igual al del SEN.

##### 16. Impacto económico y social en la comunidad por la implementación de una microrred

Entre las actividades recomendadas están los estudios de impacto económico y social que tuvo la implementación de la microrred. Los aspectos positivos servirán no solo para el reconocimiento social dentro y fuera de la comunidad, si no para reproducir estas experiencias en otras zonas similares.

##### 17. Formación de capacidades en la comunidad para garantizar el funcionamiento y continuidad de la microrred instalada

Uno de los aspectos fundamentales es la formación de capacidades en la comunidad para garantizar el funcionamiento y continuidad de la microrred. Son las personas las que garantizaran esta actividad, Por lo tanto se deberán escoger a los más preparados, entusiastas y capaces

La preparación deberá comenzar desde el inicio del proyecto y se deberá propiciar su participación directa en la construcción, puesta en marcha y pruebas, con vistas a que, conozcan los más mínimos detalles y localización de las cosas.

##### 18. Socialización de los resultados obtenidos

###### 18.1. Lecciones aprendidas

Las actividades de socialización de los resultados obtenidos en cada una de los objetos de obra o FRE, como en la instalación de una microrred, deberán tener sus espacios en reuniones técnicas y talleres organizados por el Proyecto.

Las discusiones abiertas, guiadas por algún experto o especialista en estos sistemas, constituirán la retroalimentación necesaria para solucionar los problemas técnicos y organizativos del presente y el futuro.

También otorgará crédito moral y social a los habitantes para sentirse útiles y reconocidos.

La participación de un experto también tendrá como objetivo explicar o resolver cualquier problema técnico sencillo que, por desconocimiento de los habitantes, podría poner en riesgo la aceptación de las tecnologías aplicadas.

### 18.2. Informes y publicaciones

Normalmente se necesitan elaborar informes y publicaciones en tiempo y calidad ante los organismos superiores o rectores de la comunidad, los cuales deberán ser asesorados por personal calificado. No se excluye la presentación social ante los medios, donde los actores locales como operadores, amas de casa y otros beneficiarios deberán ser seleccionados entre los más preparados para brindar una imagen positiva de la microrred.

El Anexo 1 presenta un diagrama de flujo que ilustra la secuencia de los pasos descritos.

## IV. Conclusiones

El estudio reveló un número significativo de comunidades aisladas del Sistema Electroenergético Nacional en las provincias Holguín, Santiago de Cuba y Guantánamo, donde es posible realizar proyectos de microrredes. A pesar de las dificultades para la obtención de la información, se obtuvo un censo actualizado de las comunidades con datos demográficos, técnicos y de fuentes renovables de energía, entre otros; lo cual permitirá implementar proyectos de mejoramiento del servicio eléctrico con FRE sin aumentar el consumo de combustibles fósiles, ni la contaminación ambiental. Por lo tanto, actualizar periódicamente la información sobre las comunidades aisladas resulta imprescindible para disponer de un potencial real de implementación de microrredes aprovechando las ventajas de estas zonas.

Se elaboró y aplicó una metodología para la determinar el potencial de una comunidad para la instalación de microrredes.

## V. Referencias bibliográficas

Arispe, W., Claire, J., Georg, R., Guzman, J., Jiménez, F., Juffre, A., Ledesma, Z. y Marquardt, B. (1992). *La Unidad de Biodigestión Integral. Proyecto Biogás UNSS-GTZ* (pp. 120). Bolivia.

Bérriz Pérez, L. y Álvarez González, M. (2016). *Manual de calentadores solares*. Editorial Cubasolar, La Habana, Cuba, 194 pp. 978-959-7113-49-2

Curbelo Alonso, A.J. et al. (2018). Atlas de bioenergía. Cuba (Edición 2018) (pp. 83). Editorial Cubaenergía. La Habana, Cuba.

Homer Energy, LLC (2020). HOMER (Versión 1.9) [Software] Recuperado de [www.homerenergy.com](http://www.homerenergy.com)

Moreno Figueredo, C. et. al. (2012). *Diez preguntas y respuestas sobre energía eólica*. Editorial Cubasolar, La Habana, Cuba. 978-959-7113-37-9

Rodríguez Rosales, A. (2019). *Informe sobre caracterización de la demanda energética en la comunidad Guasasa*.

Sosa Cáceres, R. (2020). *Consejo científico Cubaenergía: Informe Parcial sobre el proyecto Desarrollo de Microrredes en Cuba* (pp. 15).

Sosa Cáceres, R., Curbelo Alonso, A., Viant Garrido, E., Rodríguez Rosales, A., Suarez J, Cepero Casas, L., Saunders Vázquez, A. y Álvarez González, M. (2018). *Consejo científico Cubaenergía: Informe final sobre el Proyecto Desarrollo de un sistema de microrred inteligente con la utilización de multitecnologías energéticas renovables para lugares aislados o para circuitos cerrados*. Código P211LH 003048 (pp. 190).

## VI. Anexo

Anexo 1: Metodología de implementación de microrredes para las condiciones de Cuba. Diagrama de flujo.

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

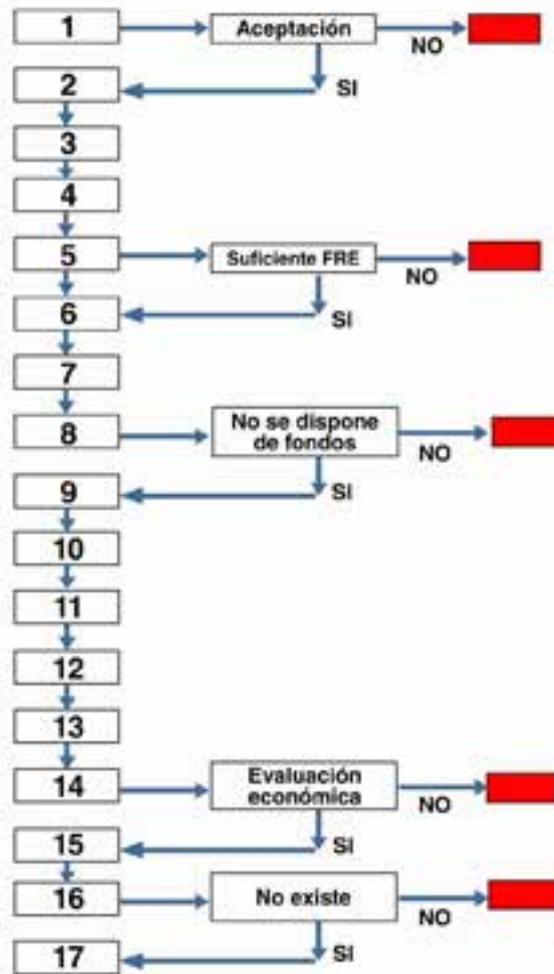
**Contribución de los autores:** Roberto Sosa Cáceres, conceptualización, curación de datos, investigación y supervisión; Enrique Viant Garrido, análisis formal, supervisión y redacción-borrador original; Ariel Rodríguez Rosales, curación de datos, análisis formal e investigación; Alfredo Curbelo Alonso, redacción-revisión; Manuel Álvarez González, edición.

Se agradece la colaboración del Centro de Información y Gestión Tecnológica (Ciget) de Holguín y Santiago de Cuba (sede conocida como Megacen); también al Centro de Aplicaciones Tecnológicas para el Desarrollo Sostenible (Catedes) de Guantánamo.

Recibido: 29 de octubre de 2022

Aprobado: 21 de noviembre de 2022

Anexo 1: Metodología de implementación de microrredes para las condiciones de Cuba. Diagrama de flujo.



# CÁLCULO DE UN SISTEMA DE ACUMULACIÓN DE ENERGÍA CON MATERIAL DE CAMBIO DE FASE (MCF) PARA UN SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN POR ABSORCIÓN

Por Dr. C. César A. Cisneros Ramírez\* e Ing. Ariel Díaz León\*\*

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Centro de Estudios de Tecnologías Energéticas Renovables (Ceter), La Habana, Cuba.

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

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

\*\* Autor independiente

## Resumen

En la investigación se realiza el cálculo de dos intercambiadores de calor, acumuladores de energía, que emplean materiales que experimentan cambio de fase (MCF). En uno de los intercambiadores, el material cambia de fase a temperatura de 121 °C y en el otro a 0 °C. La energía acumulada en el intercambiador de alta temperatura se emplea para suplir el calentamiento en el generador de la máquina de absorción, mientras que la energía acumulada en el intercambiador de baja temperatura se emplea para lograr el enfriamiento en el evaporador de dicha máquina. Los materiales de cambio de fase empleados son el eritritol para el calentamiento y hielo para el enfriamiento. La capacidad de frío de la máquina de absorción es de 7 kW. Como resultado se logró obtener las dimensiones principales de cada uno de los intercambiadores.

*Palabras clave: material de cambio de fase (MCF), sistema de refrigeración, transferencia de calor, climatización por absorción.*

---

## CALCULATION OF AN ENERGY STORAGE SYSTEM WITH PHASE CHANGE MATERIAL (MCF) FOR AN ABSORPTION AIR CONDITIONING SYSTEM

### Abstract

In the investigation, the calculation of two heat exchangers, energy storage heat exchangers, using materials undergoing phase change (MCF) is carried out. In one of the exchangers, the material changes phase at a temperature of 121 °C and in the other at 0 °C. The energy stored in the high-temperature exchanger is used to supply the heating in the absorption machine's generator, while the energy stored in the low-temperature exchanger is used for cooling in the absorption machine's evaporator. The phase change materials used are erythritol for heating and ice for cooling. The cooling capacity of the absorption machine is 7 kW. As a result, the main dimensions of the individual heat exchangers were obtained.

*Keywords: phase change material (PCM), refrigeration system, heat transfer, absorption air conditioning.*

---

## I. Introducción

El sistema de climatización por absorción (SCA) es un medio para producir frío que, al igual que el sistema de refrigeración por compresión, aprovecha las sustancias que absorben calor al cambiar el estado de líquido a gaseoso (Cengel y Boles, 2000). Así como en el sistema de compresión el ciclo se hace mediante un compresor, el ciclo de absorción se basa físicamente en la capacidad que tienen algunas sustancias de absorber otra sustancia en fase de vapor (absorción).

Estos sistemas trabajan con energía térmica como principal fuente, la cual puede ser obtenida a través de gases de escape y mediante la energía solar, la cual tiene un carácter intermitente, por lo que para un trabajo continuo del sistema de refrigeración se hace necesario adicionar un sistema de acumulación de energía, con el fin de suministrar esa energía acumulada al sistema de refrigeración en los momentos de déficit de energía solar (Cabeza *et al.*, 2020).

El sistema de acumulación se escogió del tipo *intercambiador de tubos y coraza*.

Estos intercambiadores de calor de casco y tubo son ampliamente utilizados en la industria y su diseño ha experimentado gran desarrollo.

Como medios de acumulación se escogieron materiales de cambio de fase (MCF) ya que estos tienen mayor densidad de energía (cantidad de energía por unidad de masa o volumen) que los materiales que no cambian de fase. Los materiales escogidos son el eritritol y el hielo (Höhlein *et al.*, 2017). El primero cambia de fase a 121 °C y el segundo a 0 °C. Por tanto, el objetivo de la investigación es calcular las dimensiones y parámetros fundamentales para el sistema de acumulación de energía con MCF para el sistema de climatización por absorción amoníaco-agua de 7 kW de potencia.

## Situación energética en Cuba

En la actualidad, las energías renovables representan solo el 4,3 % de la generación eléctrica del país, para el 2030 se prevé sean del 24 % (Minem, 2019).

Acorde al cambio de la matriz energética de la nación, se proyectaron los objetivos estratégicos siguientes:

- Aumentar el porcentaje de utilización de las fuentes renovables de energía.
- Reducir la dependencia de importaciones de combustibles para la generación.
- Reducir los costos de la energía entregada por el Sistema Energético Nacional (SEN).
- Reducir la contaminación medioambiental (gramos de CO<sub>2</sub> por kWh).

Una de las vías para lograr estos objetivos, es mediante el uso de la energía solar en sistemas domésticos e industriales. Cuba, país tropical, tiene magníficas condiciones para su empleo, comportándose la radiación promedio anual alrededor de los 5 kWh/m<sup>2</sup> (Bérriz y Álvarez, 2016; Álvarez y Gutiérrez, 2021).

## Materiales de cambio de fase (MCF)

El calor latente es la cantidad de energía que se almacena en un material cuando cambia su estructura molecular,

su fase o su estado de hidratación. Esta forma de almacenamiento posee grandes ventajas frente a las otras (Argiles, 2012):

- Gran densidad de almacenamiento, muy superior a la de calor sensible y similar a la de las reacciones termoquímicas, por lo que se elimina la necesidad de construcción de grandes instalaciones.
- Reducción de las pérdidas energéticas derivadas de la variación de temperatura (necesaria en la forma de almacenamiento sensible).
- Posibilidad de selección de la temperatura de trabajo (proceso de carga y descarga energética del material) según las necesidades.

Entre los posibles cambios de fase, el más interesante es el de sólido a líquido (Oliver *et al.*, 2012), y aunque la cantidad de energía almacenada es inferior a los sucedidos en otros cambios de estado (sólido-gas), la variación de volumen es menor.

Los materiales de cambio de fase líquido-sólido más comunes en el rango de temperaturas 20 °C y 80 °C son las ceras de parafina, sales hidratadas, mezclas eutécticas y ácidos grasos.

## II. Materiales y métodos

El objetivo del trabajo se centró en el cálculo de un sistema de acumulación de energía con MCF para un sistema de climatización por absorción de 7 kW de potencia frigorífica. Este sistema de acumulación está compuesto por dos intercambiadores de calor que deberán ser capaces de cumplir la función del generador y del evaporador presentes en el sistema de climatización por absorción. Como muestra la Figura 1, la instalación queda formada por un generador, un absorbedor, un condensador, un evaporador y los dos tanques intercambiadores de calor, además de una bomba y el sistema de colectores solares.

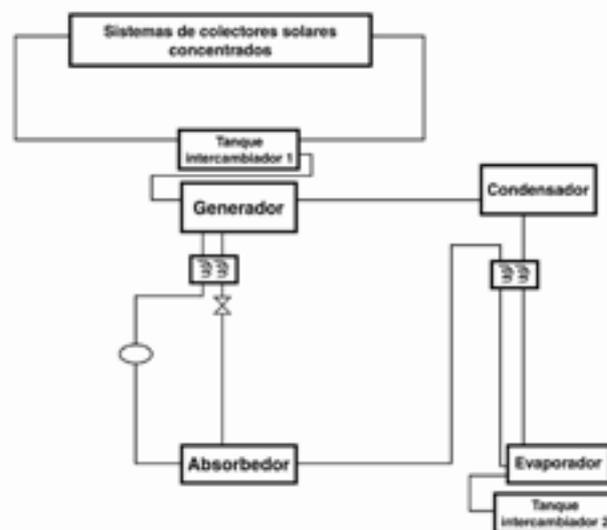


Fig. 1: Esquema del sistema de acumulación térmica en el sistema de climatización por absorción.

Los dos intercambiadores de calor considerados para el cálculo del sistema son de tipo tubo y coraza. Por los tubos circula el fluido de trabajo y en el espacio exterior de los tubos se encuentra el MCF.

En el diseño de los tanques, el material de cambio de fase se consideró en base a investigaciones realizadas en cuanto a MCF utilizados y otros diseños realizados previamente (Argiles, 2012), tomando como solución general, el eritritol para el tanque calentador y el hielo para el tanque de enfriamiento. La temperatura de calentamiento del fluido tomó 136 °C y el tiempo de autonomía 8 horas.

Asumiendo un Coeficiente de rendimiento (COP, por sus siglas en inglés) de 0,7 (Cengel y Boles, 2000) y el trabajo de la bomba aproximadamente nulo:

$$COP = \frac{q_G}{W_b + q_G} \quad (1)$$

Se obtiene que el calor a entregar en el generador debe ser  $q_G = 10$  kW. Este valor es la potencia para la cual se realizó el cálculo del intercambiador de alta temperatura.

### Cálculo de los tanques

Para la realización de este proyecto se tomaron cuatro variantes de diámetro de tuberías para tubos de acero, mostrados en la Tabla 1 (Azbel y Cheremisinoff, 1986).

Tabla 1. Tuberías normalizadas de acero

Diámetro exterior		Espesor
pulgadas	metros	milímetros
1/8	0,0105	2,00
1/4	0,0135	2,35
3/8	0,0172	2,35
1/2	0,0213	2,65

La energía a acumular ( $E$ ) se determinó (ecuación 2) a partir de la potencia necesaria en el generador ( $q_G$ ) y el tiempo de autonomía ( $\tau$ ). A partir de lo cual la masa de MCF ( $M_{MCF}$ ) necesaria en el intercambiador se determinó (ecuación 3) a partir de la energía a acumular y el calor de cambio de fase del MCF ( $\Delta h_{MCF}$ ),

$$E = q_G \cdot \tau \quad (2)$$

$$E = M_{MCF} \cdot \Delta h_{MCF} \quad (3)$$

El fluido de trabajo ( $m_{FT}$ ) se determinó (ecuación 4) a partir del flujo de calor a intercambiar en el generador de la máquina de absorción y las temperaturas de entrada y salida impuestas por el proceso ( $t_{FT,entrada}$  y  $t_{FT,salida}$ ).

$$m_{FT} = \frac{q_G}{C_{p,FT}(T_{FT,entrada} - T_{FT,salida})} \quad (4)$$

La cantidad de tubos ( $N_{tubos}$ ) se calculó (ecuación 5) a partir del diámetro de los tubos ( $d_{int}$ ), la densidad promedio del fluido de trabajo ( $\rho_{FT}$ ) y la velocidad recomendada para flujo por el interior de tuberías ( $v_{FT}$ ), la cual se asumió de 0,5 m/s (Munson y Okiishi, 2013).

$$N_{tubos} = \frac{m_{FT}}{v_{FT}(\rho_{FT} \cdot 0.25 \cdot \pi \cdot d_{int}^2)} \quad (5)$$

El área de transferencia de calor ( $A_{TC}$ ) necesaria para cumplir con las necesidades energéticas de traspaso de calor se determinó (ecuación 6) a partir del calor a intercambiar ( $q_G$ ), el coeficiente global de traspaso de calor ( $U$ ) y la diferencia de temperaturas entre los medios que intercambian calor ( $\Delta t_{log}$ ), ecuaciones 7 y 8 respectivamente (Bergman *et. al.*, 2011).

$$A_{TC} = \frac{q_G}{U \cdot \Delta T_{log}} \quad (6)$$

La determinación del coeficiente global de traspaso de calor se realizó determinando la resistencia total al paso del calor, la cual está compuesta por la resistencia del lado del fluido de trabajo, por la pared del tubo y por la del lado del MCF;  $R_{FT}$ ,  $R_{pared}$  y  $R_{MCF}$  respectivamente.

$$U = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_{FT} + R_{pared} + R_{MCF}} \quad (7)$$

$$\Delta T_{log} = \frac{(T_{FT,entrada} - T_{MCF}) - (T_{FT,salida} - T_{MCF})}{\ln \left[ \frac{T_{FT,entrada} - T_{MCF}}{T_{FT,salida} - T_{MCF}} \right]} \quad (8)$$

La longitud de los tubos ( $L_{tubos}$ ) se determinó (ecuación 9) a partir del área de transferencia de calor ( $A_{TC}$ ) necesaria para lograr el calor a intercambiar.

$$L_{tubos} = \frac{A_{TC}}{N_{tubos} \cdot d_{ext} \cdot \pi} \quad (9)$$

El volumen del tanque depende del volumen total del MCF y el volumen de los tubos (ecuaciones 10 y 11).

$$V_{tubos} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_{ext}^2 \cdot L_{tubos} \cdot N_{tubos} \quad (10)$$

$$V_{tanque} = V_{MCF} + V_{tubos} \quad (11)$$

Las dimensiones de la coraza, ancho ( $W$ ), altura ( $H$ ) y largo ( $L$ ) se determinan a continuación:

La anchura del tanque ( $W$ ) depende del número de tubos, el paso entre tubos, el número de filas y el diámetro (ecuación 11).

$$W_{tanque} = \frac{2 \cdot N_{tubos} \cdot S \cdot d_{ext}}{\lambda} \quad (12)$$

Cálculo de la altura (H) del tanque (ecuación 13):

$$H_{tanque} = \frac{Z \cdot X \cdot S}{2} \quad (13)$$

Cálculo de largo del tanque teniendo en cuenta los pasos del fluido por los tubos (ecuación 14):

$$L_{tanque} = \frac{V_{tanque}}{W_{tanque} \cdot H_{tanque} \cdot Z} \quad (14)$$

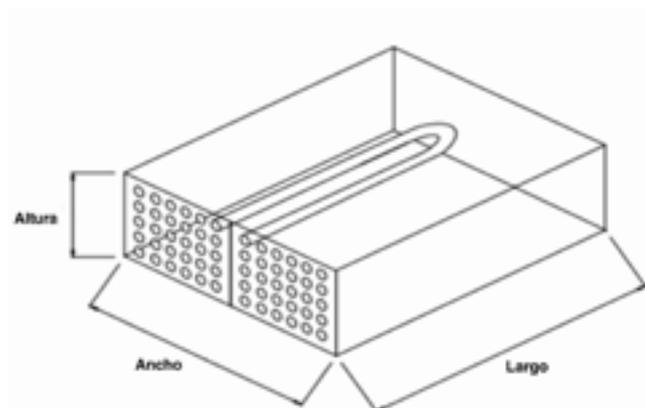


Fig. 2. Vista del tanque y distribución de los tubos.

### III. Resultados

#### Tanque de calentamiento asociado al generador

Este tanque almacena la energía usando eritritol con temperatura de cambio de fase de 121°C. Para calcular las dimensiones del tanque fueron seleccionadas cuatro variantes de diámetros de tubos (Tabla 1).

Tabla 2. Resultados para el intercambiador calentador

Datos				
Potencia (kW)	10			
Tiempo de trabajo (h)	8			
Diámetro exterior de los tubos (m)	0,0213	0,0172	0,0135	0,0105
Resultados de los cálculos				
Cantidad de tubos	8	14	26	48
Volumen del Tanque (m³)	0,603	0,600	0,596	0,594
Ancho del intercambiador (m)	0,187	0,265	0,386	0,554
Altura del intercambiador (m)	0,141	0,114	0,089	0,069
Largo del intercambiador (m)	3,815	3,326	2,889	2,576

#### Tanque de enfriamiento asociado al evaporador

El MCF de este tanque es hielo, el cual cambia de fase a temperatura de 0 °C.

La Tabla 3 muestra los datos de entrada iniciales y resultados de cálculo.

Tabla 3: Resultados para el intercambiador enfriador

Datos				
Potencia (kW)	7			
Tiempo de trabajo (h)	8			
Diámetro exterior de los tubos (m)	0,0213	0,0172	0,0135	0,0105
Resultados de los cálculos				
Volumen del Tanque (m³)	0,665	0,663	0,664	0,662
Ancho del intercambiador (m)	0,187	0,227	0,356	0,485
Altura del intercambiador (m)	0,141	0,114	0,089	0,069
Largo del intercambiador (m)	4,205	4,290	3,486	3,282

#### Cálculo económico

A partir de los precios en el mercado internacional se realizó el cálculo económico. Se consideraron los precios de las tuberías y las planchas de acero en ambos casos. El precio de los tubos es de 700 USD por tonelada y el de las planchas es de 450 USD por metro cuadrado (Alvarado, 2014). De aquí se obtiene que el precio final del tanque es:

Diámetro (pulgadas)	Calentador (USD)	Enfriador (USD)
1/2	1440	1540
3/8	1438	1620
1/4	1572	1728
1/8	1817	2015

Del cálculo realizado se obtiene que el costo específico del sistema de acumulación oscila entre los 205 a 260 \$/kW para el caso del calentador y 220 a 287 \$/kW para el caso del enfriador.

### IV. Conclusiones

El empleo de intercambiadores de acumulación de energía para un sistema de refrigeración por absorción, constituye una opción para hacer continuo el funcionamiento de estos sistemas empleando energía solar u otra fuente intermitente.

La investigación realiza el cálculo de las dimensiones principales de los intercambiadores de calor para el calentamiento y para el enfriamiento con el empleo de materiales de cambio de fase. Este cálculo fue completado con el

cálculo del costo de los acumuladores, el cual arrojó que su costo específico oscila entre los 200 a 287 \$/kW

## V. Referencias bibliográficas

- Alvarado Verdín, V. M.A. (2014). *Ingeniería económica. Nuevo enfoque* (1ra ed.). México
- Álvarez Hernández., O. y Gutiérrez Gárciga, T. (2021). Atlas de radiación solar de la República de Cuba. doi:10.13140/RG.2.2.16821.40167
- Argiles Pérez, M. (2012). *Design of PCM thermal storage unit for a HVAC system*. Universidad de Lleida.
- Azbel, D. y Cheremisinoff, N. (1986). *Chemical and Process Equipment Design vessel design and selection* (Vol. 1): Edición Revolucionaria.
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., y Dewitt, D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (7<sup>th</sup> ed.): John Wiley & Sons, Inc.
- Bérriz Pérez, L. y Álvarez González, M. (2016). *Manual de calentadores solares*. Editorial Cubasolar, La Habana, Cuba, 194 pp. 978-959-7113-49-2
- Cabeza, L. F., Martorell, I. y Berneche, C. (2020). Introduction to thermal energy storage systems. In L. F. Cabeza (Ed.), *Advance in Thermal Energy Storage Systems. Methods and Applications* (pp. 749-775).
- Cengel Y. A., y Boles, M. A. (2000). *Termodinámica* (6 ed.).
- Höhlein, S., König-Haagen, A., y Brüggemann, D. (2017). Thermophysical Characterization of MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, Xylitol and Erythritol as Phase Change Materials (PCM) for Latent Heat Thermal Energy Storage (LHTES). *Materials*, 10(444). doi:10.3390/ma10040444
- Minem (2019). Decreto Ley No.345, Ley del desarrollo de las Fuentes Renovables y el Uso Eficiente de la Energía, GOC-2019-1063-095 (28 de noviembre de 2019). Gaceta oficial No. 95 Ordinaria. Gaceta oficial de la República de Cuba. <https://www.gacetaoficial.gob.cu/sites/default/files/goc-2019-095.pdf>
- Munson, B. R., y Okiishi, T. H. (2013). *Fundamentals of Fluid Mechanics* (Seventh ed.). United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Oliver, A., Neila, J. y García Santos, A. (2012). Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica.pdf. *Materiales de Construcción*, 62(305), 131-140. doi:10.3989/mc.2012.58010

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

**Contribución de los autores:** César A. Cisneros Ramírez, conceptualización, investigación, redacción-revisión y edición; Ariel Díaz León, análisis formal, metodología, supervisión y redacción-borrador original.

Recibido: 22 de octubre de 2022

Aprobado: 19 de noviembre de 2022