

Análisis beneficio-costo de un sistema de abasto de agua con bombeo solar en una vaquería

Benefit-cost analysis of a water supply system with solar pumping in a dairy farm

✉ Enmanuel Ávila-González* and Roberto Martínez-Varona

*Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Boyeros, La Habana, Cuba.
 E-mail: enmanuel.avila@iagric.minag.gob.cu, roberto.martinez@iagric.minag.gob.cu*

*Autor para correspondencia: enmanuel.avila@iagric.minag.gob.cu

RESUMEN: El presente trabajo se desarrolló en la Unidad Científico Técnica de Base del Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, con el objetivo de hacer un análisis beneficio-costo de un sistema de abasto de agua al ganado bovino con una bomba solar. Las metodologías empleadas consistieron en calcular los elementos hidráulicos y eléctricos del sistema, partiendo del volumen conocido de consumo diario de agua de 20 vacas en producción de leche, para seleccionar una bomba y la cantidad de paneles que necesita la misma; también se utilizó la metodología para el análisis económico del sistema. Como resultado del análisis y conociendo el volumen total de agua que debieron contener los depósitos para asegurar el suministro diario a las vacas (3,60 m³/día), el caudal en las 5 horas solares pico promedio del lugar (0,20 L/s) y la altura que debió superar la bomba (19,42 m.c.a), se seleccionó la bomba solar LORENTZ PS2-100-AHPR-07S, la cual se ajustó a estas necesidades. Conociéndose el consumo de energía (0,077 kW/h), se optó por la utilización de 4 paneles de 20 kW y así se obtuvo la potencia necesaria que requirió el equipo para su correcto funcionamiento. En el análisis económico se tuvieron en cuenta la Inversión inicial (46 243,65 CUP), los Costos de explotación (55 080,05 CUP), y los Ingresos monetarios (98 550 CUP). Se concluyó que el sistema de bombeo fue rentable con una recuperación de la inversión de 1 año, 3 meses y 11 días.

Palabras clave: fuentes renovables de energía, recursos hídricos, producción pecuaria, rentabilidad.

ABSTRACT: The present work was developed at the Scientific and Technical Unit Base of the Agricultural Engineering Research Institute, with the objective to make a benefit-cost analysis of a water supply system for cattle with a solar pump. The methodologies used consisted in calculate the electrical and hydraulic system elements based on the known volume of daily water consumption of 20 cows in milk production, in order to select a pump and the number of panels necessary for this one, the methodology was also used for the design and economic analysis of the system. As a result of the analysis and knowing the total volume of water that the tanks had to contain to ensure the daily supply to the cows (3.60 m³/day), the average water flow in the 5 peak solar hours of the place (0.20 L/s) and the height that the pump had to overcome (19.42 m.c.a.), the LORENTZ PS2-100 AHPR-07S solar pumping system was selected, which met these needs. Knowing the energy consumption (0.077 kW/h), it was decided to use four panels of 20 kW and thus the necessary power required by the equipment for its correct operation was obtained. In the economic analysis, the initial investment (46,243.65 CUP), the operating costs (55,080.05 CUP), and the monetary income (98,550 CUP) were taken into account. It was concluded that the pumping system was profitable with a payback of 1 year, 3 months and 11 days.

Keywords: Energetic Renewable Sources, Hydric Sources, Livestock Production, Rentability.

INTRODUCCIÓN

La variabilidad del ciclo del agua aumenta debido al cambio climático, lo que provoca fenómenos meteorológicos extremos, reduce la capacidad de previsión de la disponibilidad de recursos hídricos, disminuye la calidad del agua y constituye una amenaza al desarrollo sostenible, la biodiversidad y el disfrute de los derechos humanos al agua potable y el saneamiento en todo el mundo (ONU-agua, 2019; Dass et al., 2021; Salas & Jovita, 2022).

La agricultura representa el 92% de la huella de agua dulce de la humanidad, y casi un tercio se relaciona con los productos animales, además, el ganado utiliza un tercio de todos los recursos hídricos, incluidas las aguas verdes, grises y azules (Vliet et al., 2021). Teniendo en cuenta las aguas azules y grises que podrían competir con el consumo de agua dulce, se estima que las industrias ganaderas consumen el 13% del suministro mundial de agua. Se estima que en el mundo hay 1 400 000 km³ de agua. Sin embargo,

Recibido: 15/01/2025

Aceptado: 27/05/2025

Conflicto de intereses: Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Contribuciones de autor: **Conceptualización:** E. Avila, R. Martínez. **Curación de datos:** E. Avila, R. Martínez. **Ánálisis formal:** E. Avila, R. Martínez. **Investigación:** E. Avila, R. Martínez. **Metodología:** E. Avila, R. Martínez. **Supervisión:** E. Avila. **Validación:** E. Avila, R. Martínez. **Papeles/Redacción, proyecto original:** E. Avila, R. Martínez. **Redacción, revisión y edición:** E. Avila.

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.



Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



los «recursos de agua dulce» son limitados. Sólo el 2,50% de todos los recursos hídricos son agua dulce, y sólo el 0,003% de esta gran cantidad, unos 45 000 km³, podría utilizarse para beber, la higiene, la agricultura y la industria. El resto está atrapado en glaciares, nieve permanente o la atmósfera. Además, no toda esta agua es accesible porque parte de ella fluye hacia ríos remotos durante las inundaciones estacionales (Bonet *et al.*, 2019; Vliet *et al.*, 2021; Frisona Española, 2022).

La creciente demanda mundial de agua conlleva un aumento de la necesidad de bombeo, transporte y tratamiento de agua con un alto consumo energético. El incremento del uso de las fuentes de energía trae como consecuencias el agotamiento de los recursos, dificultad de abastecimiento, dependencia energética y contaminación ambiental. Por lo que la temática energética se ha convertido en un factor de prioridad a nivel internacional por la importancia estratégica de asegurar el abastecimiento energético pleno y oportuno de forma compatible con el medio ambiente. Los recursos naturales y por tanto las energías renovables constituyen la base de los tres pilares del desarrollo sostenible: económico, social y calidad medioambiental (Correa *et al.*, 2016).

En los últimos años las Energías Renovables (ER) han tenido un progresivo protagonismo en la generación de electricidad en diversas partes del mundo, lo cual ha sido motivado esencialmente por la creciente conciencia sobre la irreversibilidad del cambio climático producido por las emisiones de gases de efecto invernadero dada la combustión de combustibles fósiles. Entre las tecnologías de generación mediante fuentes renovables, la Energía Solar Fotovoltaica (FV) se destaca a nivel global por su rápido crecimiento (Pla *et al.*, 2018; Avila *et al.*, 2021). La incorporación de la energía solar en sectores como la agricultura procura estimular el uso de energías limpias y hacer una utilización al máximo de los recursos naturales para la producción agrícola, obteniendo una alta productividad y aprovechamiento de los recursos. La electricidad obtenida tiene diferentes usos como por ejemplo extraer agua de un pozo, regar los cultivos mediante procesos automáticos o almacenar energía en baterías para uso en horas nocturnas. Es así como la energía solar se convierte en un ahorro para el campo, mejorando las finanzas de quienes la utilizan y aportando beneficios para el medio ambiente. Esto ha provocado que cualquier proyecto agroindustrial, ya sea de cultivos, crianza de ganado, fincas porcinas o avícolas, estén empleando en la actualidad la energía solar como fuente para el desarrollo de las actividades propias de cada una (Gacía, 2019).

Actualmente, el 95% de la matriz energética nacional se compone de combustibles fósiles (Díaz, 2018). Por ésto se hace urgente impulsar proyectos para el cambio de la matriz energética en Cuba hacia el empleo de fuentes de energías renovables (FRE). Desde 2014, Cuba cuenta con una política para el desarrollo perspectivo de las fuentes

renovables y su uso eficiente Díaz (2018), a fin de garantizar una transición segura, amigable con el medio ambiente, y la racionalidad en el empleo de los recursos. La principal fuente utilizada es la solar fotovoltaica, tecnología que cuenta con una potencia instalada de 238 MW en parques solares, que son capaces de producir la energía eléctrica consumida por unas 200 000 familias cubanas (Díaz, 2018). En la actualidad se ha logrado la instalación de alrededor de 1 200 sistemas de bombeo solar, sobre todo para el agua que se emplea en la ganadería y la actividad del riego de los cultivos (Díaz, 2018; Figueredo & Carmona, 2022).

En Cuba la producción de leche es uno de los rubros más importantes que aportan a la economía del país, sin embargo, para producir un litro de leche es necesario 4 litros de agua Senasa (2020), asimismo es necesario hacer gastos de energía eléctrica para garantizar el suministro de la misma; en vistas de emplear fuentes de energías renovables que contribuyan al ahorro energético en el sector ganadero, el presente trabajo fue realizado con el objetivo de efectuar un análisis beneficio-costo del diseño y simulación de un sistema de abasto de agua para 20 vacas en producción de leche, empleando una bomba solar fotovoltaica, con la intención que, acorde a los resultados obtenidos, contribuir a conocer el impacto potencial y las limitaciones del sistema para su implementación en el área de estudio y extensibles a fincas agropecuarias con características similares.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo fue realizado en áreas de la Unidad de Ciencia y Técnica de Base del Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), ubicada en el municipio de Alquízar en los 22°46' 49,2" de Latitud Norte y los 82° 36' 06,69" de Longitud Oeste, a 6 m.s.n.m en el suroeste de la provincia Artemisa. En el cual se realizó un diseño y simulación del sistema de abasto de agua para 20 vacas de la raza Holstein en la producción de leche, se necesitó realizar los cálculos de los componentes hidráulicos y eléctricos que lo componen, dígase bomba solar, controlador de la bomba, cantidad de paneles solares, depósitos de almacenamiento de agua y tuberías de conducción. Para ello se procede las siguientes metodologías:

Metodologías para el cálculo de los elementos hidráulicos y eléctricos del sistema de abasto de agua con bombeo solar para las vacas

Para diseñar el sistema de abasto de agua con bombeo solar para las 20 vacas, primero se plantea el esquema de diseño del Sistema de Bombeo Solar + Depósitos de Almacenamiento de agua + Aplicación de Abasto de agua al ganado, en éste se definen cada uno de los componentes que los forman (Figura 1).

Luego se procede al cálculo de la altura hidráulica de bombeo del sistema, que es la presión efectiva que debe vencer la bomba, el cual se realiza a través de la ecuación 1 establecida por Alonso & Chenlo (2010).

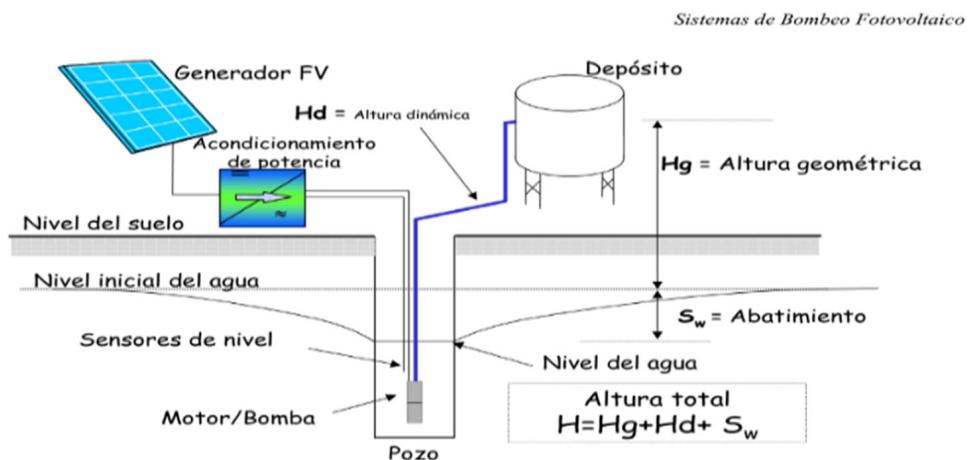


Figura 1. Esquema de diseño del sistema de abasto de agua a las vacas Fuente: Alonso & Chenlo (2010).

$$H_{Total} = H_g + H_d + H_w \quad (1)$$

Donde H_{total} es la altura total, en m; H_g es la altura geométrica, en m; H_d es la altura dinámica, en m; S_w es el abatimiento, en m.

Después se procede a calcular las pérdidas de cargas empleando la fórmula de Hazen-Williams (Ecuación 2), debido que es aplicable a diferentes tipos de tuberías.

$$hf = \frac{10,667}{D^{4,871}} \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,852} \times L \quad (2)$$

Dónde Q es el caudal expresado en m^3/s ; D es el diámetro interior de tubería en m; L es la longitud total de tubería en m; C es la constante que depende del material de la tubería (Tabla 1); hf es la pérdida de presión en m.c.a (metro columna de agua).

Tabla 1. Constante para diferentes materiales de tuberías. Fuente: Alonso & Chenlo (2010)

Material	Constante C	Material	Constante C
PVC	150	Acero Nuevo	120
PE	150	Acero Usado	110
Fibrocemento 40	140	Fundición Nueva	100

Se calculan además las pérdidas singulares las cuales son producidas a partir del roce de la geometría de las piezas por donde circula el agua, para ello se emplea la ecuación 3.

$$hs = \sum \frac{K}{2g} \left(\frac{4Q}{\pi \times D^2} \right)^2 \quad (3)$$

Donde K es la constante del accesorio (Tabla 2); Q es el caudal expresado en m^3/s ; g es la constante de la gravedad equivalente a $9,81 \text{ m/s}^2$ y D es el diámetro interior del accesorio expresado en m.

Para calcular el caudal que se emplea en las ecuaciones 2 y 3, se hará a través de la ecuación 4, donde Q es el caudal o flujo expresado en L/s , V es el volumen en L y t es el tiempo expresado en s. Asimismo, una vez obtenido el caudal, la velocidad del agua en las tuberías se calculará ya que se conoce el caudal Q y el área de la sección transversal

Tabla 2. Constante K de los accesorios. Fuente: Alonso & Chenlo (2010)

Accesorios	Constante K	Accesorios	Constante K
Codo 90°	0,90	Te con reducción $\frac{1}{2}$	0,90
Te sin reducción	0,60	Codo 90° suave	0,75
Codo 45°	0,42		

del tubo (Martínez, 2020), donde v es la velocidad del líquido expresado en m/s , A es el área en m^2 y D es el diámetro expresado en m^2 .

$$Q = \frac{V}{t} \quad (4)$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (5)$$

En el cálculo de los elementos eléctricos se tendrá en cuenta la potencia eléctrica (ecuación 6) (Martínez, 2020) que requiere el motor de la bomba, luego se seleccionará la bomba que cumpla con las características del motor.

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot h}{\eta} \quad (6)$$

Donde P es la potencia en W, ρ es la densidad del agua en $1\,000 \text{ kg/m}^3$, g es la aceleración de la gravedad en $9,81 \text{ m/s}^2$, Q es el caudal expresado en m^3/s , h es la altura hidráulica en m y η es la eficiencia.

Luego se realiza la selección de la bomba (solar), donde se hace una búsqueda en catálogos disponibles en el mercado local, que cumpla con los requerimientos de caudal (Q) y de cabeza o energía que la bomba debe suministrar al fluido (H).

Una vez seleccionada la bomba solar, se calcula la cantidad de paneles solares, teniendo en cuenta la radiación solar que se produce en el lugar donde se va a realizar la instalación, tanto para conocer la energía disponible, como para analizar el comportamiento de los componentes del sistema. Para el diseño de instalaciones fotovoltaicas, y con el fin de poder evaluar la energía que puede producir

la instalación en cada mes de año, se define el concepto de número de horas de sol pico (HSP) del lugar en cuestión, y que representa las horas de sol disponibles a una hipotética irradiación solar constante de 1000 W/m². Dicho valor permite hacer un cálculo más preciso del número de paneles requeridos en la instalación ([ecuación 7](#)) ([Perales, 2007; Montgomery, 1986](#)).

$$Nt = \frac{LMcrt}{(Pmpp)(HPS crt)(PR)} \quad (7)$$

Donde Nt es el número total de paneles, LMcrt es el consumo medio diario mensual para el mes crítico expresado en (Wp/h), Pmpp es la Potencia pico del panel en condiciones estándar de medida STC en (Wp), HPS crt son las horas pico del mes crítico, es decir: Irradiación del mes crítico expresado en (h) y PR es el factor global de funcionamiento que varía entre 0,65 y 0,90.

Metodología para el análisis beneficio-costo del sistema de abasto de agua a las 20 vacas

Los indicadores económicos empleados, serán determinados a partir de las relaciones utilizadas por [Martínez & Cisneros \(2016\)](#) en las [ecuaciones 8, 9, 10 y 11](#), los cuales se evaluarán en el abasto de agua a las 20 vacas en producción de leche en el período de un año.

$$UNAI = Bbt - Ct \quad (8)$$

$$UNDI = UNAI \times \frac{(100 - I)}{100} \quad (9)$$

$$\frac{B}{C} = \frac{Bbt}{Ct} \quad (10)$$

$$TR = \frac{Inv.}{UNDI} \quad (11)$$

Donde UNAI son las utilidades netas antes de impuesto, expresada en CUP; UNDI son las utilidades netas después de impuesto, dadas en CUP; Bbt son los ingresos brutos por venta de leche de vaca, dados en CUP; Ct son los costos totales de explotación del sistema de bombeo solar para abasto de agua a las vacas, dado en CUP; I es el impuesto por utilidades, dado en %; e Inv es la inversión inicial total.

A partir de la metodología anterior, la inversión inicial, los costos de explotación y los ingresos monetarios de la producción se determinarán del modo siguiente:

Inversión inicial

La inversión inicial (Inv.) dada en CUP, será la sumatoria de todas las inversiones (inv) que se realizaron para integrar el sistema de abasto de agua con bombeo solar ([12](#)). Dentro de estas inversiones están los Costos por la instalación del sistema de bombeo solar (Inst) (ver [ecuación 13](#)), se estima según [Méndez \(2019\)](#) como un 7% de la inversión inicial (Inv) del equipo, dado en CUP.

$$Inv. = \sum inv \quad (12)$$

$$Inst = 0,07 \times Inv. \quad (13)$$

Costos de explotación

Los costos de explotación son según [Shopify \(2021\)](#), los costos de una compañía sobre actividades que no están conectadas directamente con la actividad primaria del negocio. Son el gasto de llevar a cabo actividades del día a día, que no tienen que ver con las producciones o las ventas. Dentro de los Costos totales de explotación (Ct) del sistema de bombeo solar, que se encuentran en la [ecuación 14](#), están los costos por mantenimiento y operación del sistema (C_{MO}), los costos por depreciación del equipo (C_D), los costos de bombeo de agua de bebida para las vacas (C_B), los costos del pago salarial a los obreros agropecuarios (C_S), los costos de alimentación de las vacas (C_A), los costos de bombeo de agua para la higienización de las vacas y las instalaciones agropecuarias (C_H), y los costos para garantizar la sanidad animal y la atención veterinaria (C_V). Todos estos costos están dados en la moneda CUP.

$$Ct = C_{MO} + C_D + C_B + C_S + C_A + C_H + C_V \quad (14)$$

Para el cálculo de los costos por mantenimiento y operación del sistema (C_{MO}), debe tenerse en cuenta el 5% del pago salarial del obrero (S) encargado de esta tarea, dado en CUP/mes multiplicado por 12 meses que equivalen al período de evaluación de un año ([15](#)).

$$C_{MO} = 0,5 \times S \times 12 \quad (15)$$

Los costos por depreciación anual del equipo de bombeo solar fotovoltaico (C_D), se determinan por el método de línea recta o en base a tiempo según [Talavera \(2019\)](#), el cual se muestra en la [ecuación 16](#), donde VA es el valor activo, dado en CUP; VR es el valor residual (es optativo ponerlo en los cálculos), dado en CUP y Tvu es el tiempo de vida útil del activo, dado en años.

$$C_D = \frac{(VA - VR)}{Tvu} \quad (16)$$

Los costos de bombeo de agua de bebida para las vacas (C_B) se calcularán a partir de las necesidades diarias (N_D) dadas en m³/día, multiplicadas por los 365 días del año y por la tarifa de bombeo de agua que es según [Granma \(2021\)](#) de 7 CUP/m³ (ver [ecuación 17](#)).

$$C_B = N_D \times 365 \times 7 \quad (17)$$

Respecto a los costos del pago salarial a los obreros agropecuarios en un año (C_S), se calcularán teniendo en cuenta la sumatoria de los salarios de los obreros (S_{OA}) dados en CUP/mes, multiplicado por 12 que son los meses del año ([18](#)).

$$C_S = \sum S_{OA} \times 12 \quad (18)$$

En cuanto a los costos de bombeo de agua para la higienización de las vacas y las instalaciones agropecuarias (C_H), se debe tener en cuenta la cantidad diaria de agua empleada en la higienización (CAH), dada en m³/día, multiplicada por 365 que son los días del año

y por la tarifa de bombeo de agua que es según Granma (2021) de 7 CUP/m³ (ver ecuación 19).

$$C_H = CAH \times 365 \times 7 \quad (19)$$

Los costos para garantizar la sanidad animal y la atención veterinaria (C_V), se determinarán como la sumatoria de las atenciones veterinarias (A_V) en todas las vacas durante 12 meses, multiplicada por su precio (P_V) dado en CUP (20), en bovinos es 300 CUP.

$$C_V = \sum (A_V + P_V) \quad (20)$$

Los ingresos monetarios de la producción

Los ingresos monetarios de la producción (B_{bt}), se obtendrán a partir de los ingresos monetarios de la leche de vaca (I_{ML}) en el período de un año (21).

$$B_{bt} = I_{ML} \quad (21)$$

Para determinar los ingresos monetarios a partir de la leche de vaca (I_{ML}), se tendrá en cuenta la cantidad de vacas que están en producción de leche (N_L), multiplicado por el promedio de la producción diaria de leche de una vaca (PDL) dada en L/día, por 365 que es la cantidad de días de producción de leche en el año, y por el precio de la leche en el mercado nacional (P_L) expresado en CUP/L_{Leche} (ecuación 22).

$$I_{ML} = N_L \times PDL \times 365 \times P_L \quad (22)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados del diseño del sistema de abasto de agua con bombeo solar para las vacas

Para el diseño del sistema de abasto de agua con la bomba solar (Figura 2) para 20 vacas en producción de leche en la Unidad Científico Técnica de Base del IAgric, se partió de conocer el volumen total de consumo de agua diario de las mismas, el cual según la GOC-Cuba (2020).

es de 180 L/día (0,18 m³/día) para vaquerías típicas en Cuba, el cual incluye el agua de bebida de la vaca cuando está en proceso de gestación, que es de 120 L/día (0,12 m³/día) según el Cimagt (2013) más 60 L/día (0,06 m³/día) que incluyen el baño, la limpieza de las ubres, el agua de bebida del ternero y la higienización del corral, por lo que para 20 vacas corresponde a 2 400 L/día (2,40 m³/día).

Para asegurar la disponibilidad de agua al ganado se multiplicó el volumen de consumo diario (2,40 m³/día) por 1,50 como medida de seguridad según Ávila *et al.* (2022) en caso de días nublados u otras eventualidades climáticas que no permitan a los paneles solares generar la electricidad suficiente, para la puesta en marcha de la bomba solar, siendo el volumen total de los depósitos 3,60 m³/día.

Luego se procedió al cálculo de los elementos hidráulicos y eléctricos del sistema:

Procediendo a los cálculos hidráulicos, se tuvo en cuenta el horario solar pico promedio del sitio que es de 5 horas, el cual es el tiempo disponible para bombear el agua que necesitan las 20 vacas más el margen de seguridad Cimagt (2013). Partiendo de esto, resultó que el gasto de agua desde el depósito hasta los bebederos fue de 0,47 m³/h, por lo que, para el diseño de la conducción del agua, se seleccionó una tubería de PEBD PN40 de 20 mm de diámetro en la que la velocidad del agua calculada fue de 0,60 m/s, valor que se encuentra dentro del rango permisible para la distribución de agua en los bebederos de vacas, según el Manual de Agua Potable (Smarn-México 2015). Teniendo en cuenta que la longitud de la tubería es de 70 m, las pérdidas de carga (hf) calculadas fueron de 2,60 m, valor importante para saber la altura a la que se deben instalar los depósitos y que el agua llegue hasta los bebederos de las 20 vacas. Según los cálculos, la altura total que debió superar la bomba hasta los depósitos de agua fue de 19,42 m.c.a, para ello se seleccionaron tuberías de PEBD PN40 de 20 mm de diámetro, las cuales se ajustan al diseño y el gasto obtenido fue de 0,72 m³/h (0,20 L/s).

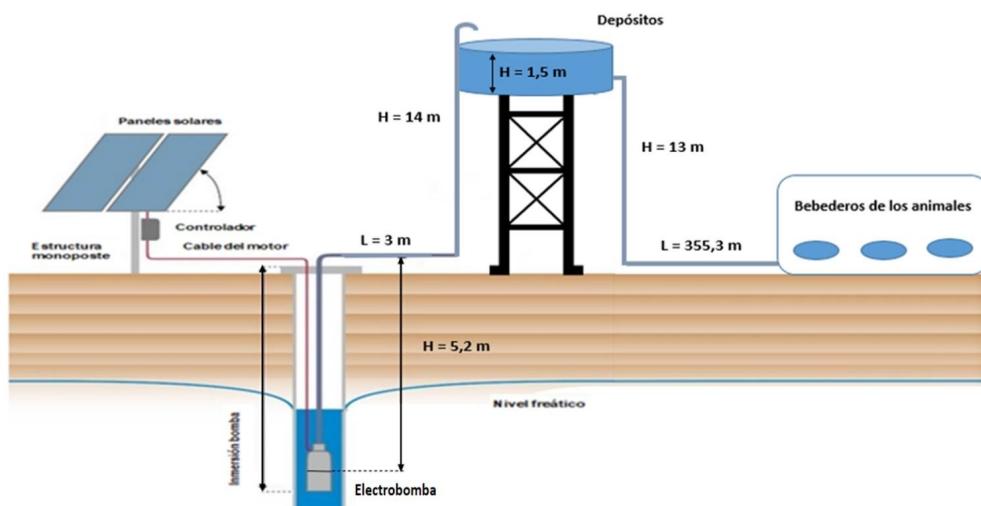


Figura 2. Diseño del esquema del sistema de abasto de agua con la bomba solar para 20 vacas en producción de leche.

Procedimiento de selección de la bomba solar:

Para suplir la demanda de bombeo de agua, se tuvo en cuenta que la bomba solar se ajustara a las características y parámetros calculados en el diseño del sistema de abasto a las 20 vacas en producción de leche. Se seleccionó la bomba solar LORENTZ PS2-100 modelo AHRP-07S (Figura 3a), esta en cuanto a las características principales que brinda el fabricante, se tiene que el sistema está integrado por un Controlador PS2-100 (Figura 3b) que posee una potencia máxima de 150 W, un voltaje de entrada máximo de 50 V (CD), corriente máxima 6 A con un modo de protección IP68 y la bomba solar, esta última fue diseñada para aplicaciones de abastecimiento de agua potable, abrevaderos o riego, es sumergible, se emplea en pozos de 3,5" (88,90 mm), la altura a la que ella transporta el agua es de hasta 40 m.c.a y su caudal máximo es de hasta 1,10 m³/h.



Controlador PS2-100. c). Panel solar marca SOLARPOWER Series-XUNZEL. Fuente: Catálogo fabricante.

Figura 3. Sistema de bombeo solar PS2-100 AHRP-07S Marca LORENTZ. a) Bomba sumergible b)

Dicha bomba trae incorporado un motor modelo ECDRIVE 100-AHR-S, que es de corriente continua (CC), sin escobillas que son libres de mantenimiento; éste tiene materiales Premium de acero inoxidable AISI 304 y no posee elementos electrónicos en el motor (Tabla 3).

Tabla 3. Datos técnicos del Motor ECDRIVE 100-AHR-S. Fuente: Catálogo del fabricante

Parámetro	Unidad de medida	Valor
Potencia nominal	W	150
Eficiencia máxima	%	83
Revoluciones motor	rpm	700...2 500
Inmersión máxima	m	50
Peso	kg	4,50

En el procedimiento del cálculo de los elementos eléctricos del sistema, se obtuvo un consumo de energía de aproximadamente 0,077 kW/h, teniendo en cuenta un rendimiento total de la instalación del 51% y contando con paneles de 20Wp, resultando un mínimo de 4 paneles. Partiendo del hecho de que el Controlador PS2-100 posee un voltaje máximo aceptado por el equipo de 50 V y la corriente de 6 A, se escogieron paneles solares de la marca SOLARPOWER Series-XUNZEL (Figura 3c) según los parámetros técnicos que se muestran

en la Tabla 4. Se optó por la instalación de un total de 4 paneles, en el que el arreglo fotovoltaico quedó conformado por 2 strings de 2 paneles conectados en serie y los 2 strings conectados en paralelo (Figura 4), lo que resultó una potencia total del arreglo de 80 W, una tensión de 34,4 V y una corriente de 2,34 A, valores que no superan el máximo aceptado por el Controlador PS2-100.

Tabla 4. Parámetros técnicos de los paneles solares Marca SOLARPOWER Series-XUNZEL

Parámetro	Unidad de medida	Valor
Potencia Máxima (Pmáx)	W	20
Voltaje nominal	V	12
Voltaje de circuito abierto (Voc)	V	21,70
Corriente de cortocircuito (Isc)	A	1,30
Voltaje en el punto de Potencia Máxima (Vmpp)	V	17,20
Corriente en el punto de Potencia Máxima (Impp)	A	1,17
Voltaje máximo del sistema	V	1 000
Nota: Condiciones de prueba estándar Irradiación=1 000 W/m ² ; AM=1,5 y T=25 °C.		

Fuente: Catálogo del fabricante.

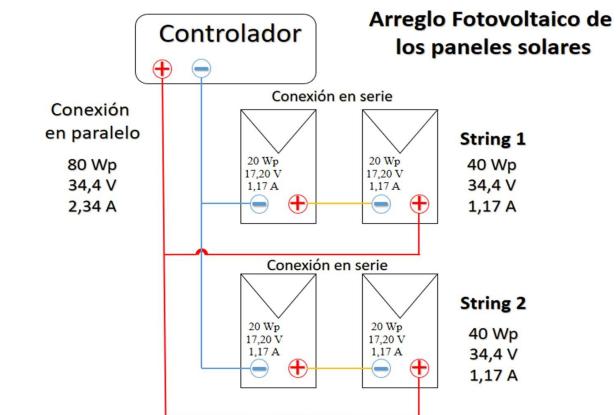


Figura 4. Arreglo fotovoltaico de los paneles solares marca SOLARPOWER Series-XUNZEL.

Referente al pozo donde se proyectó instalar el sistema de bombeo solar LORENTZ PS2-100 AHRP-07S, en la Tabla 5 se muestran las características principales de aforo del mismo.

Tabla 5. Datos específicos del pozo

Parámetro	Unidad de medida	Valor
Profundidad del pozo	m	27
Nivel estático	m	4,50
Nivel dinámico	m	10
Abatimiento	m	5,50
Diámetro del pozo	m	0,10

Resultados de la relación beneficio-costo del sistema de abasto de agua para 20 vacas en ordeño con la Bomba Solar LORENTZ PS2-100 AHRP-07S

Para la evaluación económica del sistema de abasto de agua a las 20 vacas en producción de leche, con la Bomba Solar LORENTZ PS2-100 AHRP-07S, se tuvo en cuenta que el pozo de la bomba y las instalaciones agropecuarias ya estaban construidos, por tanto, sus costos no se tomaron en cuenta en los costos de inversión inicial del sistema, pues ya fueron pagados en años anteriores.

Para obtener los resultados económicos, dígase análisis Beneficio-Costo (B/C) y Tiempo de recuperación de la inversión, fue necesario conocer el monto de la Inversión inicial del sistema, los Costos de explotación y los Ingresos obtenidos a partir de las condiciones de producción de leche del ganado bovino.

En cuanto a la inversión inicial (Inv) del sistema de abasto de agua con la Bomba Solar LORENTZ PS2-100 AHRP-07S para 20 vacas en ordeño, fue determinada según las partidas y procedimientos que se encuentran en la **Tabla 6**.

Para obtener los Costos totales de explotación fue necesario determinar cada uno de los costos que lo integran, dígase los Costos por mantenimiento y operación del sistema (C_{MO}), los Costos por depreciación del equipo (C_D), los Costos de bombeo de agua de bebida

para las vacas (C_B), los Costos del pago salarial a los obreros agropecuarios (C_S), los Costos de alimentación de las vacas (C_A), los Costos de bombeo de agua para la higienización de las vacas y las instalaciones agropecuarias (C_H), y los Costos para garantizar la sanidad animal y la atención veterinaria (C_V). Los Costos de explotación fueron determinados en CUP, a partir de las siguientes partidas y procedimientos en la **Tabla 7**.

Los ingresos monetarios de la producción de leche de vaca fueron determinados según la siguiente partida y procedimiento de la **Tabla 8**, donde el precio que tiene el producto fue el que estaba establecido por el Estado cubano, en el momento en que se realizó el análisis beneficio-costo del sistema de abasto de agua para 20 vacas en ordeño de la Unidad Científico Técnica de Base del IAGRIC con la Bomba Solar LORENTZ PS2-100 AHRP-07S

Por lo que, teniéndose los resultados de la Inversión inicial, los Costos de Explotación y los Ingresos monetarios de la producción, se pueden obtener los valores de las Unidades Netas Antes de Impuesto (UNAI) y las Unidades Netas Despues de Impuesto (UNDI), la relación Beneficio-Costo y el Tiempo de recuperación de la Inversión, los cuales se muestran en la **Tabla 9**. En dicha tabla, además, se muestra que la variante de abasto de agua al ganado bovino resultó ser rentable, siendo el tiempo de recuperación de la inversión 1 año, 3 meses y 11 días.

Tabla 6. Partidas y procedimientos para el cálculo de la Inversión inicial total del sistema de abasto de agua para las vacas

Partidas	Procedimientos
Inversión del Sistema de bombeo solar LORENTZ PS2-100 AHRP-07S.	El precio del equipo fue de 1 237,56 €, se convirtió a CUP según la tasa de cambio de la fecha de compra (1,00 € = 25,39 CUP); la inversión inicial del equipo fue de 31 431,05 CUP.
Inversión en la tubería de agua	El costo de la tubería de PEBD PN40 de 20 mm (1,21 €/m), se convirtió a CUP (1,00 € = 25,39 CUP) x la longitud de la tubería (90,70 m) resultando 2 285,78 CUP.
Depósitos de agua	Cantidad de depósitos de agua 1 200 L (3) x Precio de los depósitos (1 200 CUP)* resultando 3 600 CUP.
Torre de los depósitos de agua	Precio total de depósitos x Coeficiente (1,5) resultando 5 400 CUP.
Costos por instalación del sistema de bombeo solar (Inst)	Se estimó como un 7% de la inversión inicial (Inv), dado en CUP, resultando 3 237,05 CUP.

*RESOLUCIÓN 139 de 2020 GOC-Cuba (2020).

Tabla 7. Partidas y procedimientos para el cálculo de los costos de explotación

Partidas	Procedimientos
Costos por mantenimiento y operación del sistema (C_{MO})	Se calculó a partir del 5% del salario del obrero encargado de esta tarea (2 500 CUP) x 12 meses resultando 1 500 CUP.
Costos por depreciación del sistema de abasto (C_D)	Valor de los activos (31431,05 CUP) / Tiempo de vida útil del activo (20 años) resultando 1 571,55 CUP.
Costos de bombeo de agua de bebida para las vacas (C_B)	Las necesidades diarias de agua de las vacas (3,60 m ³ /día) x 365 días x La tarifa de bombeo de agua (7 CUP/m ³), resultando 9 198,00 CUP.
Costos del pago salarial a los obreros agropecuarios (C_S)	Salarios de los obreros (2 500 CUP/mes) x cantidad de obreros (1) agropecuarios x 12 meses, resultando 30 000,00 CUP.
Costos de alimentación de las vacas (C_A)	El pastoreo de los ganado vacuno es libre en el campo, a dichos campos de pastoreo no se les aplica riego ni fertilización, por lo que su costo es 0 CUP.
Costos de bombeo de agua para la higienización de las vacas y las instalaciones agropecuarias (C_H)	Cantidad de agua empleada en limpieza (1 m ³ /día) x 365 días x la tarifa de bombeo de agua (7 CUP/m ³)* resultando 2 555 CUP.
Costos para garantizar la sanidad animal y la atención veterinaria (C_V)	Cantidad de cabezas de ganado x Costo anual estimado de atenciones veterinarias.

Fuente: *Granma* (2021)*

Tabla 8. Partida y procedimiento para el cálculo de los ingresos monetarios

Partida	Procedimiento
Leche de vaca	Cantidad de vacas en producción x Producción de leche (6 L/día) x 365 días x Precio de la leche (7,50 CUP/L _{Leche}).
Fuente: Minag (2021)	

Tabla 9. Resultados de los indicadores económicos del sistema de abasto de agua a las 20 vacas

Variante	Inv. (CUP)	Costos Totales (CUP)	Ingresos (CUP)	UNAI (CUP)	UNDI (CUP)	B/C	TR (Años)
Vacas lactantes	46 243,65	55 080,05	98 550	43 469,95	36 080,06	1,79	1,28

CONCLUSIONES

- En los cálculos hidráulicos el volumen total de los depósitos fue de 3,60 m³/día, la altura total a superar por la bomba fue de 19,42 m.c.a y el caudal de 0,20 L/s. Para el cálculo de los componentes eléctricos se determinó el consumo de energía igual a 0,077 kW/h y se optó por la utilización de 4 paneles marca SOLARPOWER Series-XUNZEL de 20 Wp, 2 en serie y 2 en paralelo para la bomba solar seleccionada de la marca LORENTZ modelo PS2-100 AHRP-07S
- En el análisis Beneficio-Costo del Sistema de abasto de agua a las 20 vacas de la raza Holstein con la bomba solar LORENTZ modelo PS2-100 AHRP-07S, resultó ser rentable, siendo el tiempo de recuperación de la inversión 1 año, 3 meses y 11 días.
- Se recomienda la implementación del diseño del sistema de abasto de agua a las 20 vacas en producción de leche con la bomba solar y paneles fotovoltaicos seleccionados (LORENTZ PS2-100 AHRP-07S y SOLARPOWER Series-XUNZEL respectivamente) en la Unidad Científico Técnica de Base del Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola y que sea extensible a fincas agropecuarias con características similares.
- En los cálculos hidráulicos se partió de un volumen total de agua para el consumo del ganado bovino igual a 2,40 m³/día, las pérdidas de presión fueron de 2,60 m.c.a, altura a la que debieron instalarse los depósitos para asegurar que, con una longitud de tuberías igual a 70 m, el agua llegara a las vacas con una velocidad adecuada. El volumen total de los depósitos fue de 3,60 m³/día al multiplicar el consumo del ganado por 1,50 como medida de seguridad en caso de que la bomba no pudiera trabajar correctamente debido al clima, se calculó la altura total a superar por la bomba igual a 19,42 m.c.a y el caudal de 0,20 L/s. Para el cálculo de los componentes eléctricos se determinó el consumo de energía igual a 0,077 kW/h y se procedió al cálculo de la cantidad de paneles mínimos a utilizar.

- Conociendo que la altura total fue igual a 19,42 m.c.a y que el caudal era de 0,20 L/s se seleccionó el Sistema de Bombeo Solar LORENTZ modelo PS2-100 AHRP-07S, se tuvo en cuenta que el sistema estaba integrado por un controlador y la bomba. De igual manera, sabiendo que el consumo de energía del sistema fue de 0,077 kW/h, se optó por la utilización de 4 paneles marca SOLARPOWER Series-XUNZEL de 20 Wp, 2 en serie y 2 en paralelo.
- En el análisis Beneficio-Costo del Sistema de Bombeo Solar LORENTZ modelo PS2-100 AHRP-07S, se mostró que la implementación del equipo resultó ser rentable, siendo el tiempo de recuperación de la inversión 1 año, 3 meses y 11 días.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, M., & Chenlo, F. (2010). *Sistemas de Bombeo Fotovoltaico* [Maestría en Energías y Mercado Energético, Energía Solar Fotovoltaica]. Escuela de Organización Industrial, Departamento de Energías renovables, CIEMAT.
- Avila, E., Ríos, A., & Morejón, Y. (2021). Evolución histórica de las fuentes energéticas empleadas en el abasto de agua y riego agrícolas. *Ingeniería Agrícola*, 11(1), 47-57. ISSN-2306-1545, E-ISSN-2227-8761.
- Avila, E. (2022) *Evaluación técnico-económica de un sistema de bombeo solar para el abasto de agua en fincas agropecuarias*, [Tesis presentada en opción al título académico de Máster en Sistemas de Ingeniería Agrícola], Universidad Agraria de La Habana “Fructuoso Rodríguez Pérez”.
- Bonet, P.; Abad, C.; Guerrero, P.; Rodríguez, C.; Mola, F.; & Avilés, M. (2019) Propuesta de estrategia energética para abasto de agua en la ganadería, *Ingeniería Agrícola*, 9(3): 23-28. ISSN: 2306-1545, e-ISSN: 2227-8761.
- Cimagt. (2013). *Manual del Ganadero*, Centro de Investigaciones para el Mejoramiento Animal de la Ganadería Tropical (CIMAGT), Ministerio de la Agricultura (MINAG), Ediciones CIMA, 57pp, La Habana, ISBN: 978-959-7198-05-5.
- Correa, P.; González, D.; & Pacheco, J. (2016). Energías renovables y medio ambiente. Su regulación jurídica en Ecuador, Universidad Metropolitana, República del Ecuador, Universidad Central de Las Villas, Santa

- Clara, Cuba, *Revista Universidad y Sociedad* 8(3). Cienfuegos. ISSN 2218-3620.
- Dass, B.; Abhishek; Sen, S.; Bamola, V.; Sharma, A.; & SEN, D. (2021). Assessment of spring flows in Indian Himalayan micro-watersheds-A hydro-geological approach, *Journal of Hydrology*, 598. ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126354>
- Díaz, J. A. (2018).: El agua en Cuba: un desafío a la sostenibilidad, *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(2): 46-59. ISSN 1815-591X.
- Figueroedo, O., & Carmona, E. (2022). *Cuba en Datos: El ineludible cambio de la matriz energética que necesitamos*, La Habana, Cuba. <https://www.cubadebate.cu/especiales/2022/07/01/cuba-en-datos-el-ineludible-cambio-de-la-matriz-energetica-que-necesitamos/amp/>
- Frisona española. (2023). #Realidad Ganadera: ¿Cuánta agua se utiliza para producir 1 kg de carne? <https://www.revistafrisona.com/Noticia/gastro-enterologiahttps://www.revistafrisona.com/Noticia/realidadganadera-cuanta-agua-se-utiliza-para-producir-1-kg-de-carne>
- Gacía, L. (2019). *Uso de la energía solar en la agricultura*, 4 y 5pp, Artículo de Reflexión, Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Ciencias Económicas, Bogotá, Colombia.
- GOC-Cuba. (2020). "Resolución 139 de 2020: Decreto-Ley 17", "De la Implementación del Proceso de Ordenamiento Monetario", establece la unificación monetaria y cambiaria, de 24 de noviembre de 2020, La Habana, Cuba. *Gaceta Oficial de la República de Cuba*, ISSN: 0864-0793, e-ISSN: 1682-7511.
- Granma. (2021). *Nuevas tarifas para servicios de agua y saneamiento*, La Habana, Cuba. <http://www.granma.cu/tarea-ordenamiento/2021-01-16/nuevas-tarifas-para-servicios-de-agua-y-saneamiento-16-01-2021-00-01-55>,
- Martínez, C. (2020). *Diseño de sistema de bombeo a base de energía solar para suministro de agua*, [Tesis de Posgrado, Maestría de Ingeniería Aplicada]. Universidad Veracruzana, Boca del Río, Veracruz.
- Martínez, R.; & Cisneros, E. (2016). Viabilidad económica del riego localizado en el cultivo del cafeto, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25(2): 44-45. ISSN: 2071-0054.
- Méndez, A. (2019). *Estudio e implementación de un sistema de bombeo solar para una instalación de riego de bajo costo*, [Tesis de Diploma (en opción al título académico de Ingeniero Agrícola y del Medio Rural)], Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, Sección de Ingeniería Agraria, Universidad de La Laguna, Islas Canarias, España, 83pp.
- Minag. (2021). *Procedimiento para la comercialización de la leche y derivados*, Ministerio de la Agricultura. <https://www.espirituano.gob.cu/noticias/7523-procedimiento-comercializacion-leche-derivados>
- Montgomery, R. (1986). *Energía Solar, Selección de Equipos, Instalación y Aprovechamiento*. Ed. Limusa, México.
- ONU-AGUA. (2019). *Informe de políticas de ONU-AGUA sobre el Cambio Climático y el Agua* https://www.unwater.org/sites/default/files/app/uploads/2019/12/UN-Water_PolicyBrief_Water_Climate-Change_ES
- Plá, J.; Bolzi, C.; Durán, J. (2018). Energía solar fotovoltaica, generación distribuida conectada a red, *Revista Ciencia e Investigación*. Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias. ISSN- 0009-6733, e-ISSN-2314-3134.
- Perales, B. (2007). *Instalación de paneles solares térmicos: componentes, instalación*. Madrid, España. Ed. Alfa Omega.
- Salas, J. A.; & Jovita, T. (2022). La crisis del agua en la región centro sur del Estado de Chihuahua y la Convención de la ONU de 1997, *Revista Chihuahua Hoy*, 37. E-ISSN: 2448-7759, ISSN: 2448-8259.
- Shopify. (2023). *Definición Gastos de Explotación-¿Qué es Gasto de explotación?* Enciclopedia de negocios para empresas <https://es.shopify.com/enciclopedia/gastos-de-explotacion>
- Smarn-México. (2015). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Conducciones* 10, Gobierno de República de México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua, Coyoacán, México, D.F, 23pp, ISBN: 978-607-626-018-0.
- Talavera, H. (2021). *¿Cómo calcular la depreciación?* www.asesorarapyme.org
- Vliet, M., Jones, E. R., Flörke, M., Franssen, W., Hanasaki, N., Wada, Y., & Yearsley, J. R. (2021). *Global water scarcity including surface water quality and expansions of clean water technologies*, Environmental. Research. Letters, 12pp, 16. 024020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abbfc3>