



<https://eqrcode.co/a/srW5sC>

REVISIÓN

Evolución histórica de las fuentes energéticas empleadas en el abasto de agua y riego agrícolas

Historical Evolution of the Energy Sources Used in Agricultural Water Supply and Irrigation

Ing. Enmanuel Ávila-González¹, Dr.C. Arcadio Ríos-Hernández¹, Dr.C. Yanoy Morejón-Mesa¹,
MSc. Bernardo Campos-Cuní¹

¹Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, Arroyo Naranjo, La Habana, Cuba.

¹Centro de Mecanización Agropecuaria, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

RESUMEN. El agua es uno de los recursos más importantes para la subsistencia de los seres vivos; actualmente en el mundo, la agricultura emplea más del 70% en el riego de tierras agrícolas. La seguridad alimentaria depende del mejoramiento de las técnicas de riego de los pequeños agricultores de países en desarrollo, pues estos cultivan alrededor de la mitad del área agrícola mundial y el 80% carece de acceso a los servicios eléctricos. Por ello, en este trabajo, se realizó una revisión bibliográfica respecto a la evolución histórica de los distintos medios y máquinas de bombeo de agua para riego y abasto que ha creado el hombre a lo largo de la historia hasta la actualidad, en las que se ha empleado distintas fuentes y tipos de energía; con el objetivo de mostrar los avances científico-técnicos, en el uso de los recursos naturales y energéticos para el bombeo en el abasto de agua y el riego agrícola. Se concluyó, que el bombeo solar fotovoltaico representa una tecnología madura en la evolución de dichas máquinas, por usar el sol como fuente universalmente disponible, tener bajo impacto medioambiental, cero costos de combustibles y mantenimientos mínimos.

Palabras clave: bombeo solar fotovoltaico, tecnologías de bombeo de agua, historia de las máquinas de bombeo.

ABSTRACT. Water is one of the most important resources for the subsistence of living beings and today in the world agriculture uses more than 70% in the irrigation of agricultural lands. Food security depends on improving the irrigation techniques of small farmers in developing countries, since they cultivate around half of the world's agricultural area and 80% of them lack of electricity services. For this reason in this work a bibliographic review was carried out regarding the historical evolution of the different means and water pumping machines for irrigation and supply that man has created throughout history up to the present, in which has used different sources and types of energy, with the aim of showing the scientific and technical advances in the use of natural and energy resources for pumping in the water supply and agricultural irrigation. It was concluded that photovoltaic solar pumping represents a mature technology in the evolution of these machines, because it uses the sun as a worldwide available source, has low environmental impact, zero fuel costs and minimal maintenance.

Keywords: Photovoltaic Solar Pumping, Water Pumping Technologies, History of Pumping Machines.

INTRODUCCIÓN

El agua desde la antigüedad, es uno de los recursos más importantes en el planeta; su uso es imprescindible para la subsistencia de las plantas, los animales y la del ser humano, y de acuerdo con lo que plantean Cruz (2011) y Fernández *et al.*

(2011), la escasez de este líquido en el mundo es un problema grave. Por otro lado Fernández *et al.* (2011), destacan que el crecimiento demográfico, el aumento de los regímenes de demanda y la contaminación del líquido han mermado el volumen

¹ Autor para correspondencia: Enmanuel Ávila González, e-mail: enmanuel.avila@boyeros.iagric.cu

Recibido: 17/03/2020.

Aprobado: 09/12/2020.

per cápita disponible. Esta disminución de consumo de agua obliga a la sociedad a aplicar criterios de conservación y de uso sustentable del agua; es importante decir que la mayor parte del agua consumida por el hombre se destina al uso doméstico, a la industria, a la irrigación de los cultivos y al abasto del ganado. Y que actualmente la agricultura emplea más del 70% del agua utilizada en el mundo para el riego de tierras agrícolas (Roldán *et al.*, 2009; Mossande *et al.*, 2015). Del mismo modo se estima que el 60% de los alimentos extra requerido para garantizar la alimentación mundial en el futuro, tendrán que provenir de la agricultura bajo riego; donde los países en vías de desarrollo disponen del 75% del área de riego (Mossande *et al.*, 2015).

También Barreto y Duffy (2010) y Mossande *et al.* (2015), afirman y con lo cual el autor está de acuerdo, es que la seguridad alimentaria del mundo depende del mejoramiento de las técnicas de riego de los pequeños agricultores en países en vías de desarrollo, los cuales cultivan la mitad del área agrícola mundial; sin embargo, el 80% carece de acceso a los servicios eléctricos, lo que agrava la situación existente, esto también es concerniente a los productores y productoras agrícolas cubanos; porque en la actualidad según Rojas (2015) y Pérez *et al.* (2016), se consumen en el mundo alrededor de 10 000 000 000 de toneladas de combustibles fósiles al año, los cuales son altos contaminantes del medioambiente y de la capa de ozono, su costo en el mercado es elevado y no se recuperan en corto plazo de tiempo. Por esto surge la incógnita sobre el futuro energético de la humanidad y en específico sobre la agricultura, en cuanto a cuáles fuentes energéticas podrían ser utilizadas para suplir las necesidades de abasto de agua y a la vez ser amistosas con el medioambiente; ya que este problema planteado por varios especialistas como Febles (2009) y Pérez *et al.* (2016), tiene un tronco común, que es el derroche desmedido de los recursos naturales.

No obstante, desde la antigüedad el agua ha sido un elemento indispensable y vital para la supervivencia de la humanidad. Su manejo y el uso racional han dado paso a la invención de novedosas máquinas de bombeo, en la que el ser humano ha utilizado una variedad de fuentes de energía. Por lo que, para superar este problema energético y medioambiental en la agricultura, con respecto al riego agrícola de los cultivos y al abasto de agua, una de las respuestas es el uso de las fuentes de energía renovables, dentro de ellas la energía que proviene del sol; pues esta es la fuente más abundante en el mundo y en el caso de Cuba se dice que es un eterno verano, por su posición cercana al Ecuador. Esta fuente no es contaminante para el medioambiente, al contrario de la quema de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica, ésta es también parte del medioambiente y su uso es gratis.

Asimismo, por parte de las políticas implementadas en Cuba, se ve claramente un apoyo en este sentido; ya que en los Lineamientos de la política económica y social del Partido y la Revolución para el período 2016-2021, aprobados en julio de 2017, el No. 102 plantea: “Sostener y desarrollar los resultados alcanzados en “...el empleo de las fuentes renovables de energía...” (PCC, 2017b). Al mismo tiempo, en la Conceptualización del modelo económico y social cubano de desarrollo socialista

se plantea que “Se agudizó... la dependencia excesiva de fuentes no renovables de energía... además de la incidencia de muchos de estos problemas en riesgos y daños medioambientales”. Más adelante señala que “Para avanzar, Cuba cuenta con importantes fortalezas y oportunidades, entre las cuales se destacan: ... Las capacidades potenciales y ventajas naturales del país, ... y posibles fuentes renovables de energía...” (PCC, 2017a).

A partir de la energía solar en los últimos años, la generación energética fotovoltaica de acuerdo con lo planteado por Nath *et al.* (2015), es un aprovechamiento eficiente para el uso de la energía solar y el costo de los paneles solares ha ido decreciendo constantemente, por lo que en la actualidad son empleados extensamente en varios sectores como lo es en el alumbrado público, en suministrar energía para calentadores de agua y para cubrir las necesidades energéticas en los hogares. También una de las aplicaciones de esta tecnología, es en los sistemas de riego para la agricultura. Estos sistemas a través de la energía solar fotovoltaica pueden ser una fase superior del bombeo de agua en la historia y una alternativa oportuna para los pequeños agricultores en la presente crisis energética coyuntural que sufre Cuba con el bloqueo del petróleo.

Teniendo en cuenta los argumentos anteriores, se realizó una revisión bibliográfica con respecto a la evolución histórica de los distintos medios y máquinas de riego y abasto de agua que ha creado el hombre a lo largo de la historia hasta la actualidad, en las que se ha empleado distintas fuentes y tipos de energía, como lo son la fuerza del hombre, la fuerza traccional de los animales, los motores diésel o a gasolina, la energía eléctrica, la hidráulica, la eólica y la solar, en la que se tuvo en cuenta el carácter medioambiental en el uso eficiente de dichas máquinas de bombeo, con el objetivo de mostrar los avances científico-técnicos en el uso de los recursos naturales y energéticos para el bombeo en el abasto de agua y el riego agrícola.

DESARROLLO DEL TEMA

Tecnologías de bombeo de agua en la antigüedad

Desde la antigüedad, el hombre comenzó a aprovechar el agua superficial de los ríos, manantiales, riachuelos y arroyos como primeras fuentes de abastecimiento, consumo y vía de transporte, por ello los valles que están alrededor de los ríos son uno de los lugares escogidos para el establecimiento de las primeras civilizaciones, por ejemplo Egipto con el Nilo y Mesopotamia que estaba ubicada entre dos ríos, el Tigris y el Éufrates; allí fue donde el hombre aprendió a domesticar los cultivos (Ballén, *et al.*, 2006).

En contraste con la mayoría de las civilizaciones antiguas (egipcias, mesopotámicas, chinas e indias), que se desarrollaron donde el agua necesaria para el desarrollo agrícola estaba fácilmente disponible, es decir, cerca de manantiales, lagos, ríos y a bajos niveles del mar. Todas las principales ciudades helénicas durante las diversas fases de las civilizaciones griegas, que duraron milenios, se establecieron en áreas que tenían poca disponibilidad de agua, este fue el caso tanto del país continental como del insular, desde la Edad del Bronce (Zarkadoulas *et al.*,

2008). Esto se atribuye en parte a la naturaleza montañosa del paisaje terrestre helénico; además, las razones de seguridad y los esfuerzos para evitar la vulnerabilidad asociada con la ocupación de tierras fértiles de bajo nivel del mar, dieron como resultado la construcción de asentamientos en la cima de las colinas o en áreas rocosas. Es probable que estos factores limiten la disponibilidad de agua y contribuyan a la búsqueda de agua, transportando a través de largas distancias, al ahorro y a soluciones de elevación de agua (Antoniou *et al.*, 2014).

Scarborough (2003); Ortloff (2009) y Yannopoulos *et al.* (2015), muestran cómo la gestión del agua afectó las antiguas estructuras sociales y la organización a través de ejemplos típicos en los hemisferios oriental y occidental, que abarcan todo el mundo antiguo. El transporte de agua a largas distancias se basó en la gravedad, por ejemplo, se utilizaron sistemas de acueductos largos, a veces superiores a 100 km, para transportar agua a grandes distancias; además, las cisternas para la recolección de agua de lluvia, canales y pozos de agua subterránea se practicaron desde la Edad de Bronce que datan desde el 3200-1100 a. C. Por ello Mays (2010a), declara que asegurar la disponibilidad de agua en regiones de gran altitud requirió el gasto de energía; como la energía eléctrica y la energía de los combustibles fósiles eran desconocidas, los dispositivos mecánicos operados manualmente o los dispositivos impulsados por fuerzas naturales, como el viento, tuvieron que ser inventados; tales dispositivos de elevación de agua se originan en los tiempos prehistóricos.

De acuerdo con lo planteado por Mays (2010b), el autor considera también que, a través del tiempo, las dificultades que el hombre ha tenido que enfrentar han dado paso al desarrollo de nuevas tecnologías, donde se ha empleado el ingenio para dar solución a estos problemas; de esta forma las máquinas de bombeo para el abastecimiento de agua y riego de los cultivos se fueron perfeccionando, además de que se fueron explorando nuevas fuentes de energía para aumentar la eficiencia de dichas máquinas, en cuanto a bombear el mayor volumen de agua en el menor tiempo posible.

A continuación, se muestran varias máquinas de bombeo de agua que, en busca de mayor eficiencia, marcaron un hito en la historia de la humanidad, específicamente en la antigüedad y que aun en la actualidad se continúan empleando para el riego de los cultivos en la agricultura.

El Shaduf y la rueda hidráulica (noria)

El Shaduf es conocido como el primer dispositivo utilizado para levantar agua en varias civilizaciones antiguas. Según Lazos (1999) y Yannopoulos *et al.* (2015), a esta máquina se le ha denominado con diferentes nombres, como Shaduf en Egipto, zirigum en Sumer, denkli (o paecottah) en India, kilonion o kelonion en Hellas, daliya en Irak, picottah en Malabar, lat en India, gerani o geranos en Egipto helenístico, kilan (de la palabra helénica kilonion) en Israel y tolleno en regiones latinas.

El Shaduf se extendió ampliamente en el mundo antiguo, y varias civilizaciones antiguas disputan su origen e incluso el tiempo en que apareció, ya que según Ann (2009), se sabía que los mesopotámicos levantaban agua usando el

Shaduf alrededor del 3000 a. C. Asimismo Yannopoulos *et al.* (2015), dice que fue inventado en los tiempos prehistóricos probablemente en Mesopotamia ya en la época de Sargón de Akkad (Emperador de las ciudades-estado sumerias entre los años 2300 y 2100 a. C. También Viollet (2006), representa un Shaduf en un sello cilíndrico de Mesopotamia con fecha de 2200 a. C., y según Lu (2000), el Shaduf apareció en el Alto Egipto en algún momento después del año 2000 a. C., durante la décimo octava Dinastía. Este dispositivo permitió el riego de cultivos cerca de las orillas de los ríos y canales durante los períodos secos del año.

Es un dispositivo manual de madera utilizado para levantar agua de un pozo, un río, una cisterna o un canal; en su forma más común, consiste en un poste de madera largo, cónico, casi horizontal, que se monta como un balancín (Figura 1a); tiene una bolsa y una cuerda unidas en un extremo del poste, con un contrapeso en el otro (Mays, 2010a; Barata, 2014). El operador tiraba de una cuerda, unida al extremo largo, llena el contenedor y permite que el contrapeso levante el contenedor lleno (EU-Shaduf Project, 2004). A veces se montaba una serie de Shadufs uno encima del otro; una tasa de elevación de agua típica fue de 2,5 m³/d y un solo Shaduf podría regar 0,1 ha de tierra en 12 h según Mays (2010b), lo cual, a valoración del autor, podría resultar inhumano, ya que un solo hombre tenía que operar esta máquina durante todo el día, logrando regar solamente una pequeña parcela de tierra, considerando así que la fuerza de un hombre era insuficiente para llevar a cabo esta tarea a mayor escala.

El sistema se perfeccionó más tarde con la introducción de una polea y tracción animal para elevar el agua de pozos profundos; todavía se usa ampliamente en la actualidad para proporcionar agua potable y para regar pequeñas parcelas cerca de los pozos. El dispositivo también fue adaptado en la Península Arábiga según Bazza (2007), el Shaduf llevó a un aumento del área de cultivo en Egipto en un 10% a 15%.

Según asegura el autor, esto representó un paso de avance, pues el cambio de la fuerza del hombre por la fuerza de los animales como fuente energética elevó el nivel de eficiencia de estas máquinas y mejoró la situación en cuanto a la humanización del trabajo. En la historia, la invención de la rueda dio un vuelco total en el desarrollo de la humanidad, pues marcó un punto de partida en el avance tecnológico; donde varias esferas fueron beneficiadas, tales como el transporte, sistemas de levadas y en el bombeo de agua en la agricultura.

Esto se puede ver con otros dispositivos de elevación de agua inventados por los egipcios, la rueda hidráulica con ollas adjuntas, según la describen Yannopoulos *et al.* (2015) en su artículo, está conformada con compartimentos de agua y una cadena de cangilones (recipientes usados para el transporte de agua), que se ejecuta sobre una polea con cubos unidos a ella. También dichos autores afirman que el Shaduf egipcio junto con la rueda de agua, llamada también noria según se muestra en la Figura 1b, se encuentran probablemente entre los primeros dispositivos para elevar el agua y es fundamental de destacar, que se utilizaban para el riego y el suministro de agua doméstica en la época.

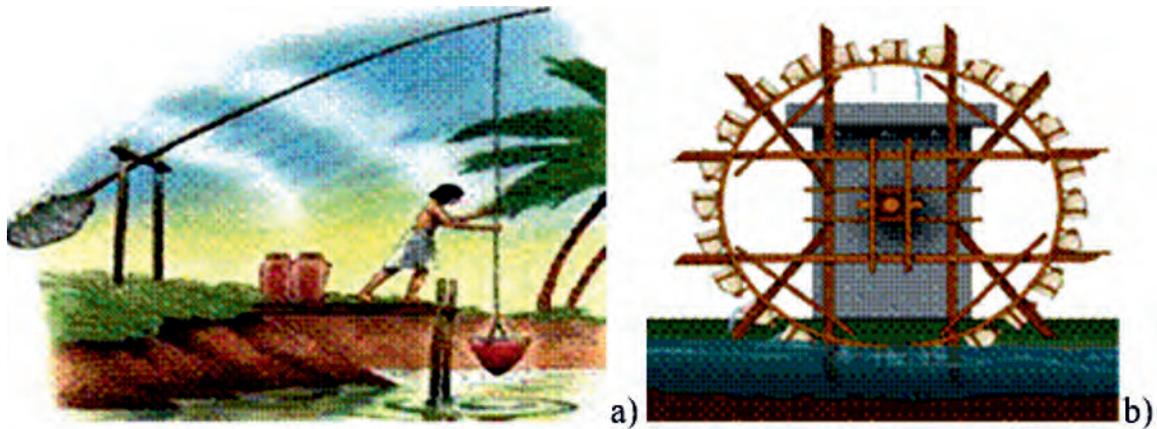


FIGURA 1. a) El Shaduf. b) Rueda hidráulica (noria). Fuente: Google.

También se cree según Oleson (2000), que la noria egipcia es la primera noria vertical en su estructura con un eje horizontal, pero este autor no concuerda con Yannopoulos *et al.* (2015) en cuanto a la fecha y lugar de invención, pues dice que fue inventada por los romanos alrededor del 700-600 a. C.; esta conforme a los estudios realizados por el mismo autor, consiste en una rueda de madera, impulsada por el flujo de agua y equipada con cubos que levantan el agua para regar las tierras cercanas. Sin embargo Oleson (2000) y Yannopoulos *et al.* (2015), concuerdan en que la difusión de la rueda hidráulica egipcia, se asocia típicamente con la civilización árabe y la rueda hidráulica impulsada por animales se considera el alto símbolo de la impronta islámica en la tecnología de riego. Igualmente, la invención de la rueda hidráulica compartimentada en Egipto puede haberse realizado a finales del siglo IV a. C., en un contexto rural, lejos de la metrópoli de Alejandría helenística y luego se extendió a otras partes del norte de África. También afirman que las ruedas hidráulicas impulsadas por camellos se utilizaron para elevar el agua para riego y uso doméstico en Afganistán y otros países asiáticos. Asimismo Bazza (2007), explica que un número limitado de estas unidades todavía está en uso en la actualidad y que, en Sudán, un sistema impulsado por bueyes se ha empleado como un simple dispositivo de riego durante siglos e incluso se sigue utilizando hasta el presente.

El tornillo de Arquímedes

Con el paso del tiempo la ciencia y la tecnología fueron avanzando, surgieron filósofos, matemáticos, físicos, astrónomos e ingenieros que se desempeñaron en el campo de la hidráulica, un ejemplo fue el destacado inventor griego Arquímedes, quien aportó varios descubrimientos matemáticos e invenciones de máquinas, pero una singular fue la que llevó su nombre, el tornillo de Arquímedes, también llamado tornillo sin fin hidráulico (Figura 2); este es un dispositivo mecánico que se utiliza para elevar el agua, data según Lazos (1999) del 287-212 a. C., este autor afirma que fue descrito, pero no necesariamente inventado por el matemático e ingeniero griego, sin embargo varios historiadores antiguos de los que hace referencia, por ejemplo, Filón de Bizancio (280-220 a. C.), Vitruvio (80-20 a. C.), Stravon (63 a. C.-23 d. C.) y Filón de Alejandría (20 a. C.-50 d. C.), consideran que fue inventada efectivamente por Arquímedes. Sin embargo, lo planteado por Tamburrino (2010) no concuerda con lo dicho por estos historiadores, pues dice que algunos relieves debajo en el palacio de Senaquerib (rey de Asiria, 705-681 a. C.) en Nínive y las referencias literarias sugerirían que el tornillo de agua fue posiblemente utilizado en Mesopotamia varios siglos antes de la época de Arquímedes. A juicio del autor, el lugar y la fecha de invención de este dispositivo sigue siendo una discusión abierta, pero sin lugar a dudas fue un invento revolucionario en la historia de la humanidad y en la de los equipos de bombeo de agua para el riego.

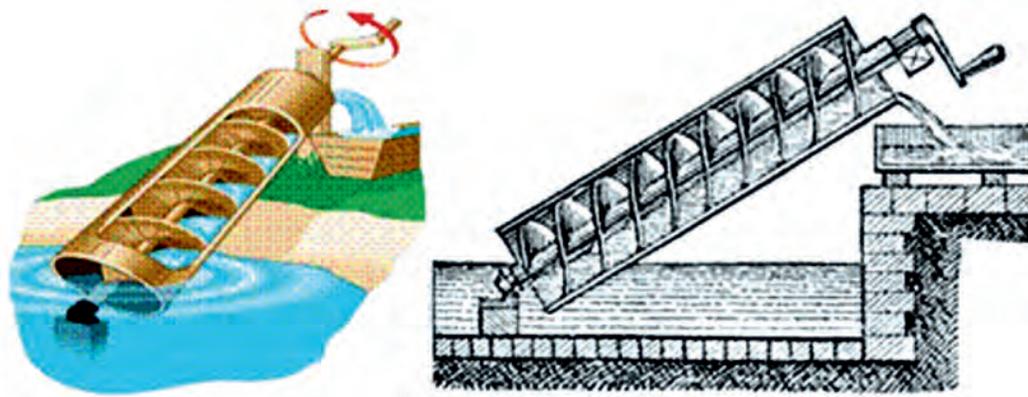


FIGURA 2. Tornillo de Arquímedes. Fuente: Google.

El tornillo de Arquímedes como tal, consiste según lo documenta Yannopoulos *et al.* (2015), en un eje de madera con curvas, hecho de ramas de mimbre o sauce delgadas y flexibles (una pegada en la parte superior de la otra) para crear un tornillo, el cual gira dentro de una tubería de madera. El dispositivo se coloca en el agua con una pendiente típica de 30°, al girar el tornillo, el agua atrapada dentro de sus bobinas se eleva hacia el extremo superior de la tubería; por lo que el tornillo de Arquímedes es el primer tipo conocido de bomba de desplazamiento según lo afirman Eubanks (1971) y Stefanaki (2008). Este dispositivo, como lo plantean Drachmann (1958) y Yannopoulos *et al.* (2015), además de ser de construcción simple, tiene la ventaja adicional de poder transportar agua que contiene barro, arena o grava.

El tornillo de Arquímedes se ha utilizado ampliamente durante siglos y es importante destacar que se ha empleado para elevar el agua de riego y el drenaje de la tierra, este a menudo fue impulsado energéticamente por la fuerza del hombre o la de los animales, las cuales estimo que en su momento daban solución al riego agrícola, pero con la fuerza limitada de estas el trabajo sería muy forzoso y poco productivo; además, para poder extraer mayores volúmenes de agua se necesitaría construir modelos más grandes, pero la limitante en su diseño sería que las fuentes energéticas existentes no serían suficientes para impulsarlo; por lo que tendrían que buscar una fuente más potente y que humanizara el trabajo, ya que estas máquinas se caracterizaron por ser impulsadas por un solo hombre, que se agotaba, se enfermaba, necesitaba detenerse para comer, beber y realizar sus necesidades fisiológicas.

Bombeo por molino de viento

En cuanto a los molinos de viento, los primeros se desarrollaron para automatizar las tareas de molienda de granos y bombeo de agua; según Yannopoulos *et al.* (2015), el diseño más antiguo conocido es el sistema de eje vertical desarrollado en Persia alrededor del 500-900 d. C. Aparentemente, el primer uso fue para el bombeo de agua, pero se desconoce el método exacto de transporte de agua, pues no hay dibujos o diseños

disponibles, solo cuentas verbales. El primer diseño documentado conocido es el de un molino de viento persa, tenía velas verticales hechas de haces de cañas o madera, que estaban unidas a un eje vertical central mediante puntales horizontales.

Los molinos de viento de eje vertical según afirma Bai-chun (2009), también se usaron en China donde a menudo han sido reclamados como su lugar de nacimiento. Si bien la creencia de que el molino de viento fue inventado en China hace más de 2000 años, está muy extendida y puede ser precisa, la primera documentación real de un molino de viento chino por el estadista chino Yehlu Chhu Tshai Dodge (2001), data del siglo XII durante la dinastía Ming. Es de destacar que las aplicaciones principales fueron la molienda de granos y el bombeo de agua (Valavanis *et al.*, 2007).

Según Hajj (2015), los molinos de viento tradicionales se han utilizado durante siglos como se argumenta en los párrafos anteriores. En la actualidad las bombas de baja potencia accionadas por molinos de viento son la aplicación mecánica más frecuente de la energía eólica para el bombeo de agua. Esta aplicación demanda un alto par de arranque y una baja velocidad específica de viento, por lo que se conoce como un “sistema eólico lento”; se usan fundamentalmente en áreas aisladas de la red eléctrica de acuerdo con lo planteado por Yannopoulos *et al.* (2015), Figura 3.

En el desarrollo económico de Cuba se establece entre sus prioridades el logro del uso eficiente de la energía, para lo cual se han elaborado programas que consideran el incremento del empleo de fuentes renovables tales como la energía eólica (Brown *et al.*, 2018; Bonet *et al.*, 2019). El uso de esta fuente de energía renovable ha reportado múltiples ventajas tales como: es una tecnología de energía renovable madura cuando se usa para el almacenamiento de agua; presenta un costo bajo en áreas que tienen un adecuado régimen de vientos; cero costos de combustible; cómodo para productores locales; bajo impacto ambiental (Companioni *et al.*, 2008). En Cuba se estima que existen alrededor de 6 000 molinos de viento y Pérez (2011) reportó que en la provincia de Holguín existen un total de 641 molinos de vientos del tipo multipala tradicional americano.



FIGURA 3. Sistemas de bombeo por molino de viento. Fuente: Yannopoulos *et al.* (2015) y Ecured.

El autor considera que los molinos de viento constituyen una tecnología favorable debido a que no emplean combustibles fósiles y se pueden instalar en áreas remotas o lejanas de la red eléctrica, además, representan una tecnología de bajo costo

cuando están ubicados en áreas que tienen un adecuado régimen de los vientos. No obstante, de acuerdo con Moreno (2018) y con Stolik (2018), las desventajas que tienen los molinos de viento en Cuba son que los vientos en su formación dependen

Ávila *et al.*: Evolución histórica de las fuentes energéticas empleadas en el abasto de agua y riego agrícolas

de la dinámica atmosférica de las altas y bajas presiones que pueden estar en el orden de varios días, es decir, que esta fuente renovable de energía se caracteriza por una intermitencia, lo que quiere decir que el bombeo de agua será irregular conforme al paso y la fuerza del viento que reciben los molinos.

Avance de las Tecnologías de bombeo de agua hacia la actualidad

Con el paso del tiempo, el hombre continuó perfeccionando las máquinas que ya había inventado y dio paso a otras más novedosas, utilizando nuevas fuentes energéticas que revolucionaron el mundo del bombeo de agua para el abasto y el riego en la agricultura. Ejemplo de ello son el ariete hidráulico, que funciona con energía hidráulica; los motores diésel o de gasolina, con la energía térmica y eléctrica; y los sistemas de bombeo solar fotovoltaico, que emplean la luz del sol para el bombeo de agua.

El sistema de bombeo por ariete hidráulico

El sistema de bombeo por ariete hidráulico consiste en una bomba de fluido impelente que emplea la energía cinética disponible de una corriente de agua, para bombear una parte de ésta a una mayor carga o altura, sin el uso de otra energía,

es decir, bombear agua con la propia agua. El efecto de bombeo se produce cuando penetra en su interior la corriente de agua, que es cortada bruscamente a intervalos regulares mediante un fenómeno hidráulico conocido como “golpe de ariete” (Figura 4) (Hajj, 2015). Es una tecnología que se ha utilizado durante los últimos dos siglos con muchas variaciones en el diseño y configuraciones básicas (Szali *et al.*, 2018).

Tiene como ventajas, que no necesita electricidad, ni ningún impulsor en absoluto fuera del fluido, ni requiere de un mantenimiento permanente, es económico, no causa contaminación, su operación es segura no necesita mano de obra durante su operación y su costo de funcionamiento teóricamente es nulo, por otro lado, la vida útil es larga y puede funcionar continuamente las 24 horas del día. Este puede solventar otras necesidades como agua potable y finalidades agropecuarias en el riego de los cultivos. En contraste, presenta como desventaja de acuerdo con Campaña y Guamán (2011), que su operación se limita a cielo abierto donde haya una corriente de agua; a juicio del autor, esta tecnología presenta la desventaja de que puede ser afectada directamente por eventos climatológicos, como huracanes, tornados e inundaciones por el crecimiento de los ríos; además solo bombean pequeños volúmenes de agua en el día, por lo que se necesitaría una tecnología con mayor potencia para cubrir las necesidades de agua para riego en la agricultura.

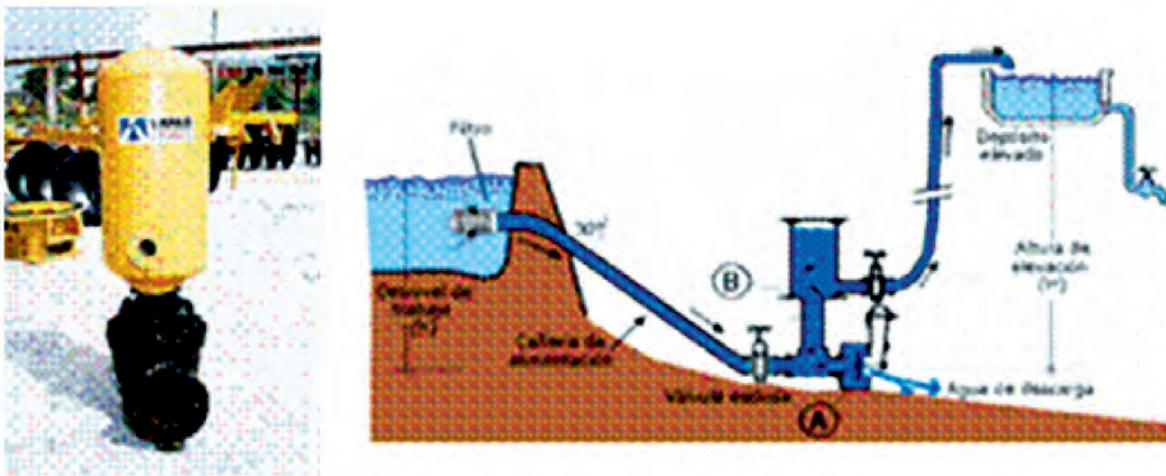


FIGURA 4. Sistema de bombeo por ariete hidráulico. Fuente: Google.

Bombeo por motores diésel o gasolina

A finales del siglo XVIII se produjo un gran avance cuando James Watt inventó la máquina de vapor (Figura 5a). En el siglo XIX la producción de motores térmicos y eléctricos (Figura 5b), y el rápido desarrollo de la industria y el crecimiento de la población urbana plantearon problemas cuya solución era imposible sin el uso de bombas. En este momento, la fabricación de bombas se convirtió en una industria importante, y su valor solo aumentó con el tiempo, buscando continuamente formas de mejorar el rendimiento de las bombas y hacer que estos dispositivos sean más confiables, eficientes y económicos (Sava Pump, 2010).

En la actualidad las bombas de pistón, los dispositivos centrífugos e incluso las bombas de vacío abren nuevos ho-

rizontes en la explotación y gestión de los recursos hídricos; sin embargo, algunos de los principios fundamentales tienen su origen en la antigüedad. La idea principal de usar energía para aumentar la energía potencial del agua sigue siendo la misma, además, los primeros mecanismos de bombeo, como el tornillo de Arquímedes, representan los primeros paradigmas de las bombas de desplazamiento, por lo que el tornillo de Arquímedes es solo un paradigma característico, que justifica la importancia y especialmente la durabilidad y sostenibilidad de las antiguas tecnologías del agua a lo largo de la historia mundial. Estas tecnologías son la base de los logros modernos en las ciencias del agua, y constituyen la mejor prueba de que el pasado es la clave del futuro, de acuerdo con lo que plantea Yannopoulos *et al.* (2015).

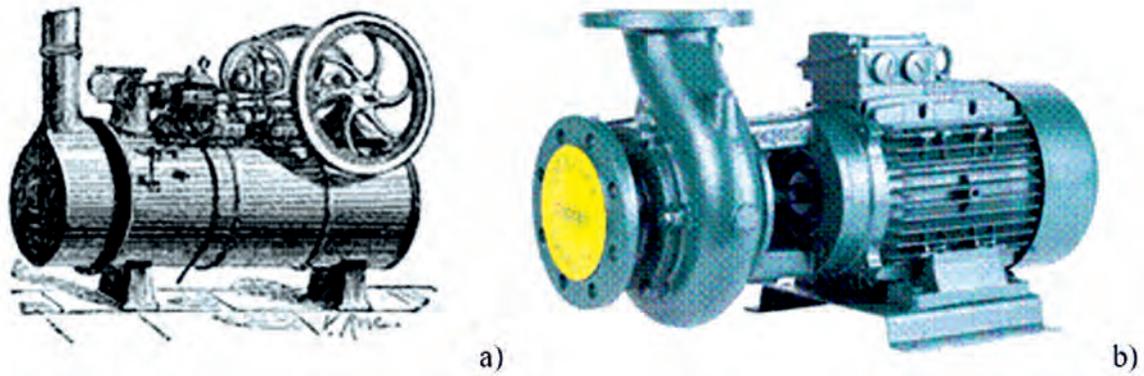


FIGURA 5. a) La máquina de vapor. b) Bomba eléctrica. Fuente: Google.

En cualquier lugar que esté disponible la red eléctrica, se utiliza principalmente como la fuente principal de energía para el bombeo de agua, para las regiones remotas no electrificadas, los generadores diésel *in situ* se han utilizado durante un largo período de tiempo para alimentar las bombas de irrigación y distribución de agua.

Asimismo, la energía renovable comenzó a convertirse en una solución cada vez más viable, especialmente con la creciente inseguridad del suministro de electricidad y los precios inestables del combustible, ofreciendo a los agricultores y residentes rurales fuentes de energía amigables con el medio ambiente para bombear agua. Las tecnologías que utilizan energía solar para alimentar eléctricamente las bombas de agua son cada vez más comunes y ofrecen ventajas competitivas sobre los generadores tradicionales de combustible (Hajj, 2015).

En lugares donde no existe suministro eléctrico son comunes las bombas accionadas por motores diésel o gasolina, esta es la tecnología más contaminante y depende en gran medida de la disponibilidad y asequibilidad de los combustibles fósiles (Figura 6) (Hajj, 2015). De acuerdo con lo planteado por este autor, los motores diésel o a gasolina, aunque poseen una alta entrega adecuada a la demanda de bombeo y son fáciles de operar, en su economía dependen del costo del combustible, recurso cuyas reservas se agotan cada vez más rápido, además, la combustión incide directamente con el aceleramiento del cambio climático por las emisiones de gases de efecto invernadero, que provocan afectaciones irreversibles a la capa de ozono. Conjuntamente, la vida útil es relativamente corta y tanto los mantenimientos como las reparaciones y la compra de las piezas de repuestos de estos equipos son de un alto costo.



FIGURA 6. Sistema de bombeo por motor diésel. Fuente: Google.

Sistemas de bombeo solar fotovoltaico

Los sistemas que utilizan la energía solar están cada vez más extendidos en distintos ámbitos de la vida cotidiana. Las aplicaciones van desde pequeñas calculadoras solares hasta sofisticados sistemas de generación eléctrica, la tecnología espacial y la agricultura; todas ellas dirigidas a satisfacer una parte o la totalidad en algunos casos de la demanda de energía. En la agricultura las aplicaciones más notables son el bombeo de agua para el abasto al ganado y el riego de los cultivos, automatización de sistemas

de riego, cercas eléctricas y electrificación rural de fincas en zonas aisladas (Antúnez *et al.*, 2016).

Se denomina energía solar fotovoltaica a la energía radiante del sol que se transforma en energía eléctrica mediante el empleo de celdas fotovoltaicas; este método se clasifica como una forma de aprovechamiento directo de la energía solar (Bravo, 2015). Dichas celdas o paneles están fabricados de silicio (el segundo elemento más abundante que se dispone, después del oxígeno), junto con otros materiales, al ser excitado por la luz solar, hace que se muevan los electrones y se genere una corriente eléctrica directa (Robledo y Torres, 2014).

Según Stolik (2018), la radiación solar que llega antes de entrar a la atmósfera es de $1\,367\text{ W/m}^2$ (denominada constante solar), al no estar todo el planeta iluminado el promedio que recibe es de unos 342 W/m^2 de los cuales el 22% se refleja nuevamente al espacio y otro 20% es absorbida por la atmósfera, por lo que alrededor de 58% (198 W/m^2) es lo que llega a la superficie del planeta, aproximadamente una mitad en forma de radiación directa y la otra difusa. La distribución geográfica no es homogénea, en términos de energía la superficie del planeta recibe radiación solar en un rango desde unos 700 kWh/año/m^2 hasta $2\,400\text{ kWh/año/m}^2$, el promedio total que recibe la superficie de la tierra es de unos $1\,700\text{ kWh/año/m}^2$, la de Cuba es algo superior a la del promedio mundial, con unos $1\,825\text{ kWh/año/m}^2$.

Un sistema de bombeo solar fotovoltaico típico, consiste en un campo de paneles solares (son los que captan la radiación solar), un sistema de control, un motor de corriente directa (CC) o de corriente alterna (CA) con un inversor, una bomba y las tuberías para el trasiego del agua (Jenkins, 2014). Algunas bombas utilizan un amplificador de corriente lineal (LCB, por sus siglas en inglés) que permite tener una corriente adicional para poner en marcha la bomba a través de la modificación de voltaje, esto permite que la bomba arranque y funcione incluso en días nublados (Hajj, 2015; Capital Nostrum Ingeniería, 2019).

Las primeras bombas solares fueron instaladas en los últimos años de la década de los setenta, desde entonces, los sistemas de bombeo solar fotovoltaico han mostrado avances significativos; la primera generación de estos equipos utilizó las bombas centrífugas, normalmente impulsadas por motores de corriente directa o de corriente alterna, con largos plazos de fiabilidad comprobados y con una eficiencia hidráulica que varía desde 25% a 35%. La segunda generación de estos sistemas introdujo las bombas de desplazamiento positivo, las bombas de cavidad progresiva y las bombas de diafragma para menores cantidades de agua, generalmente caracterizadas por necesitar poca potencia de salida de los paneles, menores costos de inversión y una mayor eficiencia hidráulica, este trabajo pionero fue llevado a cabo en diferentes países alrededor del mundo (Chandel *et al.*, 2015).

Entre los finales de la década del setenta y comienzos de la década del ochenta, numerosos problemas fueron experimentados en muchos de los sitios pilotos; entre estos, el cableado no era el correcto, las terminales no proporcionaban una buena conexión eléctrica, fallas en los circuitos electrónicos (debido al sobrecalentamiento o a la sobrecarga), por los posibles riesgos

de seguridad debido al peligro de las diferencias de voltaje de la corriente directa, por la rotura de la cubierta de cristal de los paneles fotovoltaicos (ya sea en su traslado o estacionario), entre otros problemas según describe (Halcrow, 1981).

La mayoría de estos problemas han sido eliminados en la actualidad. El año 2009, cuando el mundo se estaba recuperando de la crisis financiera global, marcó un punto decisivo para el bombeo solar, el precio de los paneles fotovoltaicos disminuyó de modo impresionante; lo cual hizo que los sistemas de bombeo solar fueran más asequibles para la agricultura. Desde ese momento se aceleró el desarrollo de estos sistemas para que fueran más potentes y eficientes; cada año, hay mayor cantidad de bombas en el mercado que son capaces de extraer agua a mayores profundidades (Hartung y Pluschke, 2018).

Las tecnologías de bombeo solar actuales utilizan softwares y sistemas electrónicos, los cuales han aumentado la potencia de salida, así como el funcionamiento y eficiencia total los sistemas de riego solar. El dispositivo clave actualmente es el controlador electrónico, el cual adapta la potencia disponible de un generador solar a una bomba solar, además de su función como controlador proporciona datos de entrada sobre varios parámetros en tiempo real, tales como el nivel de agua en los pozos, el nivel de almacenamiento de los depósitos (tanques) y la velocidad de bombeo de agua, y utiliza la tecnología de los Seguidores del Máximo Punto de Potencia (MPPT por sus siglas en inglés) para optimizar la entrega de agua del sistema de bombeo (Hartung y Pluschke, 2018).

Actualmente, el costo de los paneles fotovoltaicos se ha reducido en todo el mundo, no obstante, el costo de la inversión inicial de un sistema de bombeo solar fotovoltaico es aún mayor que los sistemas de bombeo de agua convencionales por motores diésel. El costo de inversión inicial de los sistemas de bombeo solar puede ser considerado como la mayor barrera para la aplicación de dicho sistema en países en vías de desarrollo, por lo que la optimización de los esfuerzos está enfocada a minimizarlo (Girma *et al.*, 2015).

Por otro lado, los sistemas de bombeo solar a partir energía eléctrica generada en paneles fotovoltaicos, tienen un período de funcionamiento en horas por día, con una capacidad que varía estacionalmente y a lo largo del día dependiente de la radiación solar. Se debe aprovechar ese periodo para elevar la cantidad de agua necesaria al tanque de almacenamiento para luego utilizarla en los puntos de demanda a lo largo del día (Marisquirena, 2018).

El uso de los paneles fotovoltaicos para el bombeo de agua es apropiado, ya que a menudo existe una relación entre la disponibilidad de energía solar y las necesidades de agua. Las necesidades de agua aumentan durante los periodos de clima cálido, cuando los niveles de radiación solar son los más elevados, pero a su vez la generación de corriente del arreglo solar está al máximo (Baskar, 2014).

En las pequeñas unidades de producción agropecuaria y ganadera, los sistemas de bombeo fotovoltaico (Figura 7) son uno de los mejores métodos alternativos para el abastecimiento de agua, tanto para el riego como para el suministro a los animales y a las viviendas, lo cual contribuye al ahorro de electricidad y

de combustibles fósiles; es por ello que en la agricultura cubana se han instalado más de mil sistemas de bombeos solares, fundamentalmente para el sector de la ganadería.

Respecto al aprovechamiento del agua y la energía en la producción pecuaria, en el municipio Jimaguayú, Camagüey, se llevó a cabo el Proyecto Bases Ambientales para la Sostenibilidad Alimentaria Local (BASAL) con el objetivo de implementar medidas de adaptación a los efectos del cambio

climático y específicamente con respecto a los efectos de las intensas sequías en la producción pecuaria; también en la UEB Genética “Los Pinos” de la Empresa Pecuaria “Triángulo Tres” de Camagüey, se realizó un estudio general que permitió conocer la situación específica de cada una de las fuentes de abasto existentes y las posibilidades de lograr un más eficiente nivel de uso del agua a partir de una estrategia integral que priorizó el empleo de fuentes renovables de energía (Bonet *et al.*, 2019).



FIGURA 7. Sistemas de bombeo solar fotovoltaico. Fuente: Google y Ferias Agropecuarias.

En el caso de la ganadería, según el autor argumenta, los sistemas de bombeo fotovoltaico se emplean para garantizar la disponibilidad de agua de los animales, ya que son una alternativa viable para el abastecimiento de agua en los tiempos de sequía, pueden emplearse con éxito para el riego de los cultivos, bien directamente o mediante el llenado de depósitos elevados que permite regar por gravedad tanto de día como de noche, disminuyendo considerablemente la desnutrición o la muerte del ganado, y resultan imprescindibles en las áreas donde no llega la energía eléctrica o que son de difícil acceso para los camiones cisterna (pipas). Es decir que el efecto conservacionista que tienen los sistemas de bombeo fotovoltaico reduce el uso de la red eléctrica y el empleo de combustibles fósiles, por lo cual es una solución amigable con el medio ambiente; la electricidad que se obtiene es gratuita una vez que se amortiza la inversión inicial, estos sistemas requieren un mínimo de mantenimiento y atención, ya que pueden ser de arranque y apagado automático.

El bombeo de agua con paneles fotovoltaicos es una de las soluciones propuestas para satisfacer la actual demanda energética de los productores cubanos.

CONCLUSIONES

- El hombre con el cursar del tiempo, ha perfeccionado las técnicas de bombear agua, a partir de las necesidades básicas de abastecerse tanto a sí mismo, como de abastecer a los animales y el riego de los cultivos aprovechando los recursos naturales y energéticos que tiene a su alcance.
- Desde el punto de vista medioambiental, en el empleo de los recursos naturales y energéticos para el abasto de agua y el riego agrícola; el bombeo solar fotovoltaico representa una tecnología madura en la evolución de dichas máquinas, por usar el sol como fuente universalmente disponible, tener bajo impacto ambiental, cero costos de combustibles y mantenimientos prácticamente nulos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANN, C.: History of Water Pumps, eHow Contributor, [en línea], Ehow, 2009, Disponible en: http://www.ehow.com/facts_5031932_history-water-pumps.html, [Consulta: 28 de octubre de 2019].
- ANTONIOU, G.; LYBERATOS, G.; KANETAKI, E.; KAIAFA, A.; VOUDOURIS, K.; ANGELAKIS, A.; ANGELAKIS, A.; ROSE, J.: “History of urban wastewater sanitation technologies in Hellas”, En: Evolution of Sanitation and Wastewater Management through the Centuries, Angelakis, Ed. IWA Publishing, A., Rose, J., ed., London, UK, pp. 101–148, 2014.
- ANTÚNEZ, A.; MARTÍNEZ, M.; SCHMIDT, R.: Aplicaciones de energía solar fotovoltaica en la agricultura de zonas áridas, no. Boletín INIA N° 332, Inst. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Santiago de Chile, Chile, 114 p., 2016.
- BALLÉN, J.; BALLÉN, M.A.; ORTIZ, R.O.: “Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia”, En: VI SEREA-Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua João Pessoa (Brasil) 5 a 7 de junio de 2006, Brasil, 2006.
- BARATA, C.I.A.: High power PV pumping systems: two case studies in Spain, Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente, Lisboa, Portugal, 67 p., 2014.
- BARRETO, C.; DUFFY, J.: “Riego solar-eólico por goteo de bajo costo para pequeños agricultores”, En: Cusco: IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar (IV ISES_CLA) y XVII Simposio Peruano de Energía Solar (XVIIISPES), Cusco, Perú, p. 1-5. 11, 2010.
- BASKAR, D.: “Efficiency improvement on photovoltaic water pumping system by automatic water spraying over photovoltaic cells”, Middle-

Ávila *et al.*: Evolución histórica de las fuentes energéticas empleadas en el abasto de agua y riego agrícolas

- East Journal of Scientific Research, 19(8): 1127-1131, 2014, ISSN: 1990-9233, DOI: <http://dx.doi.org/10.5829/idosi.mejsr.2014.19.8.11232>.
- BAZZA, M.: "Overview of the history of water resources and irrigation management in the Near East region", *Water Science and Technology: Water Supply*, 7(1): 201-209, 2007, ISSN: 1606-9749.
- BONET, P.C.; ABAD, C.A.; GUERRERO, P.P.; RODRÍGUEZ, C.D.; MOLA, F.B.; AVILÉS, M.G.: "Propuesta de estrategia energética para abasto de agua en la ganadería", *Revista Ingeniería Agrícola*, 9(3): 23-28, 2019, ISSN: 2306-1545, e-ISSN: 2227-8761.
- BRAVO, H.D.: "Energía y desarrollo sostenible en Cuba", *Centro azúcar*, 42(4): 14-25, 2015, ISSN: 2223-4861.
- BROWN, M.O.; MÉNDEZ, J.N.; BERNAL, E.M.: "Evaluación de un sistema de micro irrigación accionado por energía eólica", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 27(1): 13-21, 2018, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- CAMPAÑA, C.N.; GUAMÁN, D.A.: Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico, Escuela Politécnica Nacional, Facultad De Ingeniería Mecánica, Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, Quito, Ecuador, 8 p., 2011.
- CAPITAL NOSTRUM INGENIERÍA: Bombeo Solar. Ventajas del Bombeo Solar 2019, [en línea], Capital Nostrum Ingeniería, 2019, Disponible en: <https://capitalnostrum.com/bombeo-solar/>, [Consulta: 28 de octubre de 2019].
- CHANDEL, S.S.; NAIK, M.N.; CHANDEL, R.: "Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49: 1084-1099, 2015, ISSN: 1364-0321.
- COMPANIONI, J.L.; MUJICA, C.A.; BROWN, M.O.; ALFONSE, L.L.; PÉREZ, W.: "Determinación de los parámetros de funcionamiento del molino de viento X-702 para el suministro de agua con fines de riego", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 17(4): 75-78, 2008, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- CRUZ, B.D.: Estudio de ahorro mediante bombeo solar, Ed. Universidad Internacional de Andalucía, Andalucía, España, 4 p., 2011, ISBN: 978-84-7993-949-6.
- DODGE, D.M.: Illustrated history of wind power development. Part 1-Early History through 1875, [en línea], Telosnet, 2001, Disponible en: <http://telosnet.com/wind/early.html>, [Consulta: 30 de diciembre de 2019].
- DRACHMANN, A.G.: "The Screw of Archimedes", En: VIII Congrès International d' Histoire des Sciences, VIII Congrès International d' Histoire des Sciences, vol. 3, Paris, France, pp. 940-943, 1958.
- EUBANKS, B.M.: The Story of the Pump and Its Relatives, Inst. OR, Salem, USA, 185 p., 1971.
- EU-SHADUF PROJECT: Annual Report of EU-Shaduf 017-04-500348-29, NAGREF, Inst. Institute of Iraklion, Iraklion, Greece, 2004.
- FEBLES, G.: "La diversidad biológica en Cuba, características y situación actual. Estrategia nacional y plan de acción", *Cuban Journal of Agricultural Science*, 43(3): 211-223, 2009, ISSN: 2079-3480.
- FERNÁNDEZ, D.S.; MARTÍNEZ, M.R.; TAVAREZ, C.A.; CASTILLO, R.; SALAS, R.: Estimación de las demandas de consumo de agua, Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación, Inst. Subsecretaría de Desarrollo Rural Dirección General de Apoyos para el Desarrollo Rural. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México, 4 p., 2011.
- GIRMA, M.; ASSEFA, A.; MOLINAS, M.: "Feasibility study of a solar photovoltaic water pumping system for rural Ethiopia", *AIMS Environmental Science*, 2(3): 697-717, 2015, DOI: <http://dx.doi.org/10.3934/environsci.2015.3.697>.
- HAIJ, N.: Solar-Powered Pumping in Lebanon. A Comprehensive Guide on Solar Water Pumping Solutions, Inst. UNDP. Federal Department of Foreign Affairs FDFA, Swiss Agency for Development and Cooperation SDC, Lebanon, 2015.
- HALCROW, W.: Small-Scale-Powered Irrigation Pumping Systems, Technical and Economic Review, World Bank World Bank, 1981.
- HARTUNG, H.; PLUSCHKE, L.: The benefits and risks of solar-powered irrigation - a global overview, Ed. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), or of Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Rome, Italy, 2018, ISBN: 978-92-5-130479-2.
- JENKINS, T.: Designing solar water pumping systems for livestock, Ed. NM State University, Cooperative Extension Service, Engineering New Mexico ..., Circular 670, Cooperative Extension Service, Engineering New Mexico Resource Network, College of Agricultural, Consumer and Environmental Sciences ed., College of Engineering, New Mexico, USA, 2014.
- LAZOS, C.D.: Hydraulic equipment and mechanism, Aeolus, (In Greek), 1999.
- LU, J.Y.: Science and Civilization in China: Mechanical Engineering, Inst. Science Press, Volume 10, Beijing, China, 2000.
- MARISQUIRENA, L.: "Bombeo solar, experiencias en Uruguay y la región. Perspectivas de futuro", *Revista Ingeniería Agrícola*, 8(1): 60-70, 2018, ISSN: 2306-1545, e-ISSN: 2227-8761.
- MAYS, L.W.: "A brief history of water technology during antiquity: Before Romans", En: Ancient Water Technologies Mays, L.W, Ed. Springer Science and Business Media, Dordrecht, Mays, L. W. ed., vol. Chapter 1, The Netherlands, pp. 1-28, 2010a.
- MAYS, L.W.: "Water technology in ancient Egypt", En: Ancient Water Technologies Mays, L. W., Ed. Springer Science and Business Media, B. V.: Dordrecht ed., The Netherlands, pp. 53-66, 2010b.
- MORENO, F.C.: "Presentación de doce preguntas sobre energía eólica", *Revista Energía y tú*, 82: 17-19, 2018, ISSN: 1028-9925.
- MOSSANDE, A.R.; BROWN, M.O.; MUJICA CERVANTES, C.A.; MATA, R.C.; OSORIO, L.I.: "Riego por goteo con energía solar para el tomate en Cavaco, Benguela, Angola", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(2): 11-17, 2015, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- NATH, V.; OGUBAZGHI, G.; PRASAD, B.M.; KUMAR, A.; KAUR, D.: "Scope and Review of Photovoltaic Solar Water Pumping System as a Sustainable Solution Enhancing Water Use Efficiency in Irrigation", *American Journal of Biological and Environmental Statistics*, Science Publishing Group, 1(1), 2015, DOI: <http://dx.doi.org/10.11648/j.ajbes.20150101.11>.
- OLESON, J.: Water-Lifting, in Wikander, Örjan, Ed. Handbook of Ancient Water Technology, Technology and Change in History, vol. 2, Leiden, The Netherlands, 217-302 p., 2000, ISBN: 90-04-11123-9.
- ORTLOFF, R.C.: Water engineering in the ancient world: Archaeological and climate perspectives on societies of ancient South America, the Middle East, and South-East Asia, Ed. Oxford University Press, New York, USA, 433 p., 2009, ISBN: 0-19-923909-6.

- PCC: Conceptualización del modelo económico y social cubano de desarrollo socialista, Inst. PCC (Partido Comunista de Cuba), Introducción, La Habana, Cuba, 2017a.
- PCC: Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución, Inst. PCC (Partido Comunista de Cuba), V Política de ciencia, tecnología, innovación y medio ambiente, La Habana, Cuba, 48 p., 2017b.
- PÉREZ, D.; VÁZQUEZ, A.; PÉREZ, O.G.; PÉREZ, T.; HERNÁNDEZ, A.: “Estudio energético del sistema de bombeo en el Instituto de Ciencia Animal Cuba”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25(3): 65-71, 2016, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054, DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/>
- PÉREZ, R.: Rediseño de los molinos de viento “Veleta” que se utilizan para el bombeo de agua, Universidad de Holguín, Trabajo de Diploma (en opción al título de Ingeniero Mecánico), Holguín, Cuba, 64 p., 2011.
- ROBLEDO, S.C.; TORRES, N.A.: Diseño y establecimiento de la comunidad beneficiada con un sistema de abastecimiento energético usando energía solar fotovoltaica en la ciudad de Girardot, Inst. Corporación Universitaria Minuto de Dios, Facultad de Ingeniería, Girardot, Colombia, 2014.
- ROJAS, D.M.: “La región andina en la geopolítica de los recursos estratégicos”, *Análisis político*, 28(83): 88-107, 2015, ISSN: 0121-4705, DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/anpol.v28n83.51649>.
- ROLDÁN, C.J.; DÍAZ, J.M.; PÉREZ, A.R.; MORENO, P.M.F.: “Mejora de la gestión del agua de riego mediante el uso de indicadores de riego. Irrigation water management improvement using performance irrigation indicators.”, *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo.*, 42(1): 107-124, 2009.
- SAVA PUMP: Water Pump History, [en línea], Sava Pump, 2010, Disponible en: <http://www.savapump.com/water-pump-history> [Consulta: 28 de octubre 2019].
- SCARBOROUGH, V. L.: *The Flow of Power: Ancient Water Systems and Landscapes*, School of American Re-s, [Consulta: 28 de octubre de 2019].
- SCARBOROUGH, V.L.: *The flow of power: ancient water systems and landscapes*, Ed. School for Advanced Research on the, Santa Fe, NM, USA, 204 p., 2003, ISBN: 1-930618-32-8.
- STEFANAKI, S.: *Didacti képroséng isetou embadoútes éleipses me anafarástoérgo Sfairoeidikai Konoeidétou Arjiméde*, University of Athens, Master Thesis, Athens, Greece, 2008.
- STOLIK, D.: “Ventajas y desventajas de la energía fotovoltaica. Bosquejo integral para la aplicación de la FV”, *Revista Energía y tú*, 82: 9-13, 2018, ISSN: 1028-9925.
- SZALI, F.; MUNSZY, M.; SHAHRUL, M.; BAKRI, A.; MOHAMMAD, Z.; ISMAIL, Z.: “Development and Testing of Hydraulic Ram Pump (Hydrum): Experiments and Simulations”, En: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 2018, DOI: <http://dx.doi.org/440.012032>. 10.1088/1757-899X/440/1/012032.
- TAMBURRINO, A.: “Water technology in ancient Mesopotamia”, En: *Ancient Water Technologies*, Mays, L, Ed. Springer Dordrecht Heidelberg, London, UK, New York, USA, pp. 29-51, 2010.
- VALAVANIS, K.P.; VACHTSEVANOS, G.J.; ANTSAKLIS, P.J.: “Technology and autonomous mechanisms in the mediterranean: From ancient Greece to Byzantium”, En: *2007 European Control Conference (ECC)*, Ed. IEEE, pp. 263-270, 2007, ISBN: 3-9524173-8-6.
- VIOLLET, P.L.: *Water Management in the Early Bronze Age Civilization*, Inst. La Ingeniería y La Gestion Del Agua a Través de Los Tiempos, Alicante, Spain, 2006.
- YANNOPOULOS, S.I.; LYBERATOS, G.; THEODOSSIOU, N.; WANG, L.; VALIPOUR, M.; TAMBURRINO, A.; ANGELAKIS, A.N.: “Evolution of Water Lifting Devices (Pumps) over the Centuries Worldwide.”, *Water*, 7: 5031-5060, 2015, ISSN: 2073-4441, DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/w7095031>.
- ZARKADOULAS, N.; KOUTSOYIANNIS, D.; MAMASSIS, N.; PAPALEXIOU, S.: “Climate, water and health in ancient Greece”, En: *Climate, water and health in ancient Greece*, European Geosciences Union General Assembly, Ed. European Geosciences Union, vol. 10, Vienna, Austria, 2008.

Enmanuel Avila-González, Investigador, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric). Boyeros, La Habana, Cuba, e-mail: enmanuel.avila@boyeros.iagric.cu

Arcadio Ríos-Hernández, Investigador Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric). Boyeros, La Habana, Cuba, e-mail: iagricolaboracion@hab.minag.cu

Yanoy Morejón-Mesa, Profesor Auxiliar, Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: yym@unah.edu.cu

Bernardo Campos-Cuní, Investigador, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric). Boyeros, La Habana, Cuba, e-mail: bernardo.campos@boyeros.iagric.cu

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

Este artículo se encuentra sujeto a la Licencia de Reconocimiento-NoComercial de Creative Commons 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0).

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