

XVI Congreso Ibérico y
XII Congreso Iberoamericano
de Energía Solar
Madrid, España, 20-22 junio 2018
©Asociación Española de Energía Solar

VIABILIDAD ECONÓMICA DE SISTEMAS DE RIEGO FOTOVOLTAICO DE ALTA POTENCIA EN LA REGIÓN DE ECOWAS

Lorenzo C.*, Almeida R. H.*, Martínez-Núñez M.*, Narvarte L.*, Carrasco L. M.***

*Universidad Politécnica de Madrid, Comunidad de Madrid, 28031 (Madrid) España,
celena.lorenzo@ies.upm.es

** Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 1749-016 (Lisboa)
Portugal

RESUMEN

Este artículo presenta una evaluación económica de sistemas de riego fotovoltaico de alta potencia (del orden de los cientos de kWp) en la región de ECOWAS, considerando sólo la inversión necesaria para sustituir (en sistemas de riego ya existentes) la red eléctrica o grupos diésel por un generador fotovoltaico. El estudio compara 7 países y dos modos de operación distintos: contra balsa y a presión constante. Los indicadores económicos obtenidos son muy favorables: TIR entre 8-47%, VAN entre $0.33-41.5 \times 10^5$ \$, PRI entre 2.1-10 años. El LCOE está entre 4.5-17.4 \$cents/kWh, lo cual supone ahorros de 30-84% en comparación con sistemas alimentados por la red o por grupos diésel.

PALABRAS CLAVE: Fotovoltaico, Sistema de Riego, Evaluación Económica.

ABSTRACT

This paper presents an economic assessment of large power (hundreds kWp) PV irrigation systems in the ECOWAS region, considering only the investment needed for substituting diesel-powered and grid-powered systems with PV ones. Seven countries and two irrigation operating modes were compared: pumping to a water tank or at constant pressure. Economic indicators are very encouraging: NPC values are in the $0.33-41.5 \times 10^5$ \$ range, IRR values are in the 8-47% range and PBP values are in the 2.1-10 years range. LCOE for PV irrigation systems are in the 4.5-17.4 \$cents/kWh range, which represent percentage savings of 30-84% if compared to diesel-powered and grid-powered systems.

KEYWORDS: Photovoltaic, Irrigation System, Economic Assessment.

INTRODUCCIÓN

El riego agrícola es una actividad que requiere grandes consumos de agua, la mayoría de la cual debe ser bombeada desde depósitos subterráneos: esto se traduce en una importante demanda de electricidad. El uso de generadores FV acoplados a bombas de agua representa una opción muy atractiva para reducir tanto el coste económico como el impacto ambiental del consumo eléctrico para riego. La viabilidad técnica y económica del bombeo FV ya ha sido analizada en estudios recientes (Li et al., 2017; Wazed et al., 2018), tanto para aplicaciones de suministro de agua como de riego. Sin embargo, todos estos estudios hacen referencia a sistemas con potencias fotovoltaicas relativamente pequeñas (hasta 30kW), los cuales tienen menores eficiencias y mayores costes unitarios de instalación que los sistemas de mayor potencia. Recientemente, el proyecto europeo MASLOWATEN ha llevado a cabo las validaciones técnicas y económicas de 5 demostradores FV de gran tamaño (con potencias pico entre 40 y 360 kW) situados en el Sur de Europa. Sin embargo, los resultados de este tipo de evaluaciones son muy dependientes de la localización del sistema, por lo que sería interesante trasladarlos a otras regiones del planeta.

El objetivo de este trabajo es analizar las condiciones en las que los sistemas autónomos de riego FV de gran potencia (del orden de los cientos de kWp) son viables en la región de ECOWAS (Economic Community of West African States), donde el ECREEE (ECOWAS Centre for Renewable Energy and Energy Efficiency) está promoviendo el uso de fuentes de energía renovables para aplicaciones agrícolas. El análisis llevado a cabo se centra en evaluar la sustitución de la conexión a red o de grupos diésel por un generador FV en sistemas de riego ya existentes. Los indicadores económicos empleados son la Tasa Interna de Retorno (TIR), el Valor Actual Neto (VAN), el Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI) y el “Levelized Cost of Energy” (LCOE), los cuales se han calculado para 7 países de la región de ECOWAS. Para estos 7 países se han comparado 4 casos de estudio: las bombas de riego pueden estar alimentadas originalmente por la red eléctrica o por grupos diésel (que serían en cualquier caso sustituidos por un generador FV) y pueden tener dos posibles modos de operación (bombeo contra balsa o a presión constante).

METODOLOGÍA

Simulación de los sistemas de riego fotovoltaico

En primer lugar, se han simulado 7 sistemas FV autónomos (sin conexión a red y sin baterías) en los 7 países seleccionados, asumiendo que están localizados en regiones con alta irradiancia (ver Tabla 1). El objetivo de estas simulaciones es calcular el volumen medio de agua bombeado diariamente y la potencia FV generada en un año de operación.

Estas simulaciones se han llevado a cabo con el software SISIFO (IES-UPM, 2017) para dos modos de operación: contra balsa y a presión constante. Los datos de irradiación diaria global horizontal (obtenidos de la base de datos PVGIS) se transforman en valores de irradiancia horaria directa en el plano del generador utilizando los siguientes modelos: Erbs (Erbs et al. 1982), Collares-Pereira y Rabl (Collares-Pereira y Rabl, 1979), Pérez (Pérez et al. 1987) y Martínez (Martínez-Moreno et al. 2010). Se ha asumido un 2% de suciedad, un coeficiente de reflectividad del suelo de 0,2, unas pérdidas en AC del 1,5% y en DC del 3%. El generador FV simulado, con una potencia de 380 kWp, está compuesto por módulos

de silicio policristalino de 250 W y está montado sobre un seguidor Norte-Sur de eje horizontal, que permite adaptar mejor el perfil de irradiancia incidente a las necesidades de riego. Se han seleccionado una moto bomba de 165 kW y un variador de frecuencia de 220 kW.

Tabla 1. Coordenadas de las regiones consideradas para simular lo sistemas de riego FV.

País	Región	Latitud [°]	Longitud [°]
Benin	Parque Nacional del W	12,050	3,032
Burkina Faso	Reserva del Sahel	14,881	-0,1
Cabo Verde	Praia	14,924	-23,533
Guinea	Dinguiraye	11,222	-10,723
Liberia	Voinjama	8,413	-9,748
Nigeria	Kano	12,018	-8,613
Sierra Leona	Fintonia	9,649	-12,225

Análisis de viabilidad económica

Con los resultados obtenidos con el simulador SISIFO, se ha llevado a cabo un análisis de viabilidad económica a 25 años, asumiendo que el sistema de riego ya existe y que sólo hay que sustituir la conexión a red o grupos diésel por un generador FV. En definitiva, la rentabilidad de la inversión inicial vendrá dada por el ahorro resultante de no tener que consumir electricidad de la red ni combustible diésel. Dicha rentabilidad se expresa en este trabajo en términos de la TIR, el VAN y el PRI. Los ingresos obtenidos por la venta de cultivos no se consideran en este análisis, ya que serían los mismos independientemente de cómo se alimentase el sistema de riego. Para el cálculo de los flujos de caja anuales se ha asumido un coste de instalación de 1,7 \$/Wp (información del proyecto MASLOWATEN), unos costes de sustitución y de mantenimiento del 2% de la inversión inicial cada uno (Campana et al, 2015) y un coeficiente de amortización lineal del 7% (BOE, 2014). Los módulos FV experimentan una degradación del 0,8% anual a partir del sexto año de vida (Kiefer et al, 2010). Los demás parámetros de entrada dependen del país donde se encuentre el sistema de riego: tarifas eléctricas (EP), precios del combustible diésel (DP), impuestos sobre el beneficio (t) y tasas de descuento nominal (i) y de inflación (f). Los valores utilizados aparecen resumidos en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores utilizados para el análisis de viabilidad económica (fuente: World Bank).

País	EP (\$/kWh)	DP (\$/l)	t (%)	i (%)	f (%)
Benin	0,23	0,82	9,96	5,6	-0,2
Burkina Faso	0,25	0,94	16,24	5,6	2,9
Cabo Verde	0,33	0,97	18,26	9,6	-0,9
Guinea	0,16	0,89	0	4,8	10,6
Liberia	0,56	0,83	35,35	13,6	5
Nigeria	0,20	0,55	17,46	16,9	9,6
Sierra Leona	0,26	0,78	17,27	18	4,2

Levelized Cost of Energy (LCOE)

El cálculo del LCOE se ha efectuado utilizando la Ec. (1) (Intaniwet y Chaiyat, 2017):

$$LCOE = \frac{\sum_{n=0}^{25} \frac{(IIC + OM + FC_n)}{(1+i)^n}}{\sum_{n=0}^{25} \frac{PVE_n}{(1+i)^n}} \quad (1)$$

donde *IIC* es la Inversión Inicial de Capital, *OM* es el coste de Operación y Mantenimiento, *FC_n* es el coste de combustible en el año *n* y *PVE_n* es la energía FV generada en el año *n*. Para sistemas alimentados con un generador FV, *FC_n* es cero y *OM* se estima en un 2% de *IIC*. Para sistemas alimentados con grupos diésel, *IIC* es cero, *OM* se estima en 40\$/kW anuales (Breyer et al, 2010) y *FC_n* se calcula con los resultados del SISIFO y el precio del diésel (DP) en cada país. Para sistemas conectados a red, LCOE es equivalente al precio de la electricidad (EP) en cada país.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Simulación de los sistemas de riego fotovoltaico

La Tabla 3 presenta los resultados de las simulaciones con SISIFO (el volumen de agua bombeada diariamente, la energía DC generada y los litros de diésel necesarios para generar la misma cantidad de energía eléctrica, asumiendo que los grupos diésel consumen de media 0.286 l/kWh -datos de MASLOWATEN-) para los dos modos de operación del sistema de riego (contra balsa y presión constante). Se puede observar que en los sistemas contra balsa se bombea un volumen de agua mayor que a presión constante. Esto se debe a que, en el primer caso, es posible realizar el seguimiento del punto de máxima potencia del generador FV, mientras que para trabajar a presión constante normalmente hay que hacerlo a potencias menores.

Tabla 3. Resultados de las simulaciones de los sistemas de riego fotovoltaico.

País	Contra balsa			Presión constante		
	Agua (m ³ /día)	E _{DC} (MWh)	Diesel (x10 ³ l)	Agua (m ³ /día)	E _{DC} (MWh)	Diesel (x10 ³ l)
Benin	2343	913,9	261,1	1769	606,6	173,3
Burkina Faso	2361	949,1	271,2	1832	628,6	179,6
Cabo Verde	2321	932,5	266,4	1800	617,1	176,3
Guinea	2346	918,4	262,4	1800	617,5	176,4
Liberia	2283	851,8	243,4	1667	571,6	163,3
Nigeria	2344	916,8	261,9	1783	611,7	174,7
Sierra Leona	2299	866,9	247,7	1769	606,6	173,3

Análisis de viabilidad económica

Las Figs. 1-3 muestran los valores de la TIR, el VAN y el PRI obtenidos para los 7 países seleccionados y los 4 casos de estudio considerados. Una inversión es rentable cuando la TIR es mayor que la tasa de descuento real, el VAN es positivo y el PRI es significativamente menor que el tiempo de vida del sistema (25 años): estas condiciones se cumplen para todos los casos aquí presentados. En general, los sistemas bombeando contra balsa son más rentables que los sistemas bombeando a presión constante, ya que para una misma potencia permiten bombear más agua (ver Tabla 3). Guinea es el país donde resulta más rentable (en términos de TIR y VAN) sustituir grupos diésel por un generador FV, debido al elevado precio de este combustible. En cuanto a sustituir un punto de conexión a red, es más rentable en Liberia (en términos de TIR) -por el elevado precio de la electricidad- y en Burkina Faso (en términos de VAN) -por la baja tasa de descuento-. Es importante destacar que los PRI obtenidos son todos menores de 10 años (menos de la mitad del tiempo de vida del sistema).

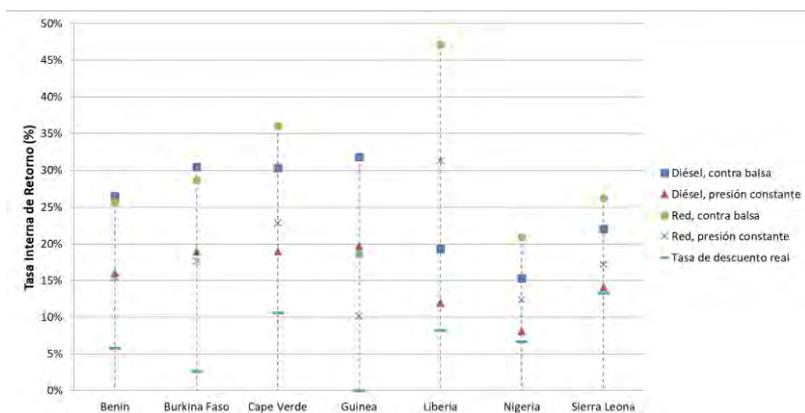


Fig. 1. Valores de la TIR (%) obtenidos para los casos de estudio considerados.

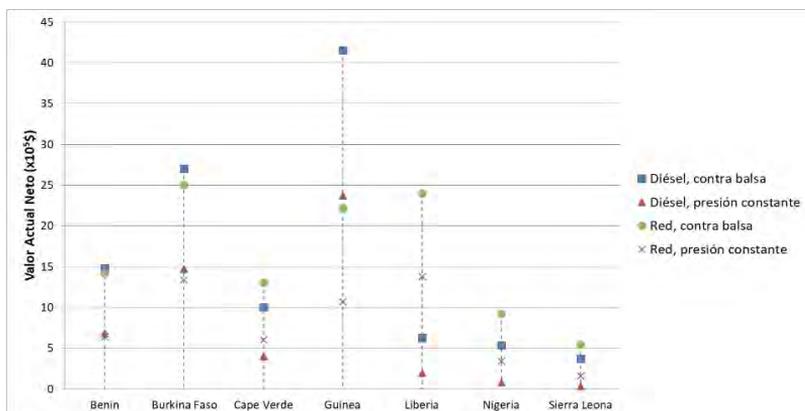


Fig. 2. Valores del VAN ($\times 10^5\$$) obtenidos para los casos de estudio considerados.

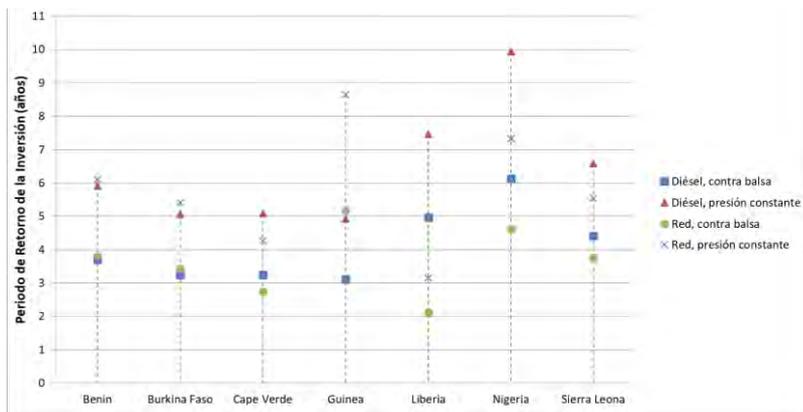


Fig. 3. Valores del PRI (años) obtenidos para los casos de estudio considerados.

Levelized Cost of Energy (LCOE)

La Tabla 4 presenta los resultados obtenidos para el LCOE, para los 7 países y los 4 casos de estudio considerados. Los números entre paréntesis representan el ahorro porcentual comparando el LCOE de un sistema FV con la tarifa eléctrica de cada país (izquierda) y con el LCOE de un sistema diésel (derecha). Estos ahorros son muy significativos: son todos superiores al 30% y la mayoría superiores al 50%. Además, igual que para los resultados anteriores, se observa que es más beneficioso instalar sistemas bombeando a contra balsa que a presión constante.

CONCLUSIONES

Este trabajo presenta una evaluación económica de sistemas de riego fotovoltaico de alta potencia en la región de ECOWAS. Se ha evaluado la inversión necesaria para sustituir la alimentación con la red eléctrica o con grupos diésel por un generador fotovoltaico, para 7 países y para dos modos de operación distintos: a contra balsa y a presión constante. Se han obtenido los siguientes resultados:

- La TIR es mayor que la tasa de descuento real para todos los casos, y está en el rango 8-47%.
- El VAN es positivo para todos los casos y está en el rango $0.33-41.5 \times 10^5$ \$.
- El PRI es menor de 10 años para todos los casos, menos de la mitad del tiempo de vida del sistema (25 años), y está en el rango 2.1-10 años.
- El LCOE para sistemas FV es menor que para sistemas alimentados con la red o con grupos diésel, y está en el rango 4.5-17.4 \$cents/kWh, lo cual supone ahorros de 30-84%.

En términos generales, instalar generadores fotovoltaicos en sistemas de riego ya existentes en la región de ECOWAS parece muy ventajoso económicamente. Resultan más rentables los sistemas operando a contra balsa que a presión constante.

Tabla 4. Valores de LCOE (\$cents/kWh) obtenidos para los casos de estudio considerados. Los valores entre paréntesis representan el ahorro porcentual si se comparan con las tarifas eléctricas (izquierda) y con el LCOE de un sistema diésel (derecha).

Country	Tarifa eléctrica (\$cents/kWh)	LCOE (\$cents/kWh)			
		Diésel, contra balsa	Diésel, presión constante	FV, contra balsa	FV, presión constante
Benin	22.8	25.2	26.1	7.2 (69) (71)	10.8 (53) (59)
Burkina Faso	25.4	28.6	29.4	5.4 (79) (81)	8.2 (68) (72)
Cabo Verde	32.5	29.6	30.3	9.7 (70) (67)	14.6 (55) (52)
Guinea	16.4	27.2	28.1	4.5 (72) (83)	6.7 (59) (76)
Liberia	55.6	25.6	26.5	9.1 (84) (64)	13.6 (76) (49)
Nigeria	20.2	17.5	18.3	7.6 (62) (56)	11.4 (44) (38)
Sierra Leona	25.9	24.1	24.9	12.2 (53) (50)	17.4 (33) (30)

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Banco Africano de Desarrollo a través del proyecto [ACTC-WA2] – ECREEE. También se ha recibido financiación del Programa de Sistemas de Energía Sostenible del MIT Portugal y de la Fundación Portuguesa de Ciencia y Tecnología, grant PD/BD/105851/2014 y proyecto IDL (UID/GEO/50019/2013) para Rita Hogan Almeida. Finalmente, este trabajo ha sido posible gracias al programa R&I del Horizonte 2020 de la Unión Europea, a través del proyecto MArket uptake of an innovative irrigation Solution based on LOW WATer-ENergy consumption (MASLOWATEN), grant n°640771.

REFERENCIAS

- Boletín Oficial del Estado (2014), <https://www.boe.es/boe/dias/2014/11/28/pdfs/BOE-A-2014-12328.pdf>
- Breyer C., Gerlach A., Schäfer D., Schmid J. (2010) Fuel-Parity: new very large and sustainable market segments for PV systems. *IEEE Energy Conference, Manama, Bahrain*.
- Campana P. E., Li H., Zhang J., Zhang R., Liu J., Yan J. (2015) Economic optimization of photovoltaic water pumping systems for irrigation. *Energy Convers. and Manag.* 95, 32-41.
- Collares-Pereira M., Rabl A. (1979) The average distribution of solar radiation - correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Solar Energy* 22(2), 155-164.
- Erbs D. G., K. S. A., Duffie J. A. (1982) Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy* 28(4), 293-302.
- IES-UPM (2017), SISIFO, <http://sisifo.adminia.es/>
- Intaniwet A., Chaiyat N. (2017) Levelized electricity costing per carbon dioxide intensity of an organic Rankine cycle by using a water hyacinth-municipal solid waste fuel. *Energy* 139, 76-88.
- Kiefer K., Dirnberger D., Müller B., Heydenreich W., Kröger-Vodde A. (2010) A degradation analysis of PV power plants. *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Valencia, España*.
- Li G., Jin Y., Akram M. W., Chen X. (2017) Research and current status of the solar photovoltaic water pumping system - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79, 440-458.
- Martínez-Moreno F., Muñoz J., Lorenzo E. (2010) Experimental model to estimate shading losses on PV arrays. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 94(12), 2298-2303.
- Perez R., Seals R., Ineichen P., Stewart R., Menicucci D. (1987) A new simplified version of the Perez Diffuse Irradiance model for tilted surfaces. *Solar Energy* 39(3), 221-231.
- Wazed S. Mohammed, Hughes B. R., O'Connor D., Kaiser Calautit J. (2018) A review of sustainable solar irrigation systems for Sub-Saharan Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81, 1206-1225.