

Dimensionamiento de un sistema de generación fotovoltaico para el riego de cebolla en el valle bonaerense del Río Colorado

Juan Pablo D'Amico¹; Patricio Varela¹; Sergio Justianovich²; Marcos Hall²

1)EEA Hilario Ascasubi. INTA; 2)IPAF Región Pampeana. INTA

Informe técnico de la E. E. A. Hilario Ascasubi N° 48
ISSN 0328-3399



INFORME TECNICO Nº 48

ISSN 0328-3399

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)

Estación Experimental Hilario Ascasubi

Ruta Nac. Nº 3 Km 794

(8142) Hilario Ascasubi.

Buenos Aires. Argentina

Enero 2016

<http://inta.gob.ar/ascasubi>

Dimensionamiento de un sistema de generación fotovoltaico para el riego de cebolla en el valle bonaerense del Río Colorado

D´Amico, J.P; Varela, P; Justianovich, S; Hall, M.

1. Resumen

En el valle bonaerense del río Colorado las prácticas habituales de riego gravitacional tienen una eficiencia del 50%. La principal actividad productiva de la zona es el cultivo de cebolla sobre una superficie de 13 000 ha. La adopción de técnicas de riego más eficientes está condicionada a la provisión de energía y al impacto económico que este servicio tenga en la rentabilidad de la actividad. Se ha demostrado que la energía fotovoltaica presenta numerosas ventajas para ser aplicada al riego, pero no se cuenta con información de sistemas aplicados al cultivo de cebolla. En base a la metodología propuesta por diferentes autores, se realizó el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico para el riego por goteo de cebolla que permite alcanzar una eficiencia en el uso del agua de 90%. El dimensionamiento realizado permitió establecer que la potencia instalada para un sistema de generación cerrado es de 3KW. Sin embargo se concluye que la instalación de un sistema de 1,5 KW complementado con la provisión de energía a partir de otras fuentes, resulta más eficiente en función de la capacidad instalada.

2. Introducción

En el área de influencia del Valle Inferior del Río Colorado, la dotación de agua en superficie mediante la conducción por canales y acequias es utilizada para el riego alternativo o reincidente de 140.000 ha (CORFO, 2012).

El volumen de agua demandado en la zona ha aumentado prácticamente un 90% desde 1990 a la actualidad como consecuencia de la intensificación de la producción de cultivos altamente demandantes como la cebolla y el incremento de la superficie bajo concesión de riego (CORFO 2012). Como contrapartida se observa una tendencia a la reducción de la disponibilidad de agua aportada por el río y a un aumento de la concentración de sales de calcio, magnesio y en menor medida sodio.

El riego gravitacional realizado por surco, melga o tablón representa el 98% de la superficie regada. De acuerdo con lo informado por Sánchez (2012) los niveles de pérdida en la aplicación bajo estas prácticas son del 50%.

El cultivo de cebolla es una de las principales actividades productivas en el valle bonaerense del río Colorado, con una superficie cultivada cercana a las 13.000 ha. Los niveles de producción permiten abastecer el mercado interno de cebollas de día largo y generar un saldo exportable significativo. Se trata de la actividad con mayor aporte al producto bruto agropecuario de la región (Iurman 2012).

Sánchez (2012) concluye que es necesario incrementar la eficiencia de riego de este cultivo, dado que es el que mayor desfasaje presenta entre la demanda neta y la aplicación bruta de láminas de riego.

Se ha demostrado acabadamente el sustancial aumento en la eficiencia del uso del agua que se logra mediante riego localizado (Gavilán et al. 2015). La aplicación de agua mediante riego localizado por goteo contribuye a minimizar procesos de salinización del suelo. Esta tecnología resulta más apropiada para planteos conservacionistas por la escasa intensidad de laboreo y movimiento de suelo que requieren para su implementación.

En las áreas de riego con disponibilidad de agua en superficie por el aporte de ríos, la provisión energética resulta limitante para la adopción de tecnologías que permitan hacer más eficiente el uso del agua. Los sistemas de riego presurizado presentan una demanda energética muy diversa en función de la tecnología puesta en juego (Hernández Calzada 2012).

La energía solar fotovoltaica resulta un recurso limpio, renovable y disponible en una gran diversidad de áreas geográficamente distantes o inaccesibles. Diversos autores resaltan la conveniencia de la aplicación de la energía fotovoltaica en sistemas destinados al bombeo de agua para riego (Cuadros et al. 2004, Kelley et al. 2012).

Adicionalmente Cuadros et al. (2004) resaltan la escasa necesidad de mantenimiento de los sistemas fotovoltaicos respecto de los equipados con motores de combustión y la coincidencia en el tiempo que tienen la mayor generación de energía disponible para el bombeo y la mayor tasa de evapotranspiración del cultivo.

Diversos autores han estimado con diferentes métodos el dimensionamiento de los equipos de bombeo mediante energía fotovoltaica y su factibilidad respecto de otras fuentes de energía (Gao et al. 2013, Zvonimir y Jure 2007).

Odeh, et al. (2006) sostienen que los principales factores que afectan las prestaciones de un sistema de bombeo de agua con energía fotovoltaica son las características de la bomba, el caudal de aplicación, la frecuencia y distribución de riego, la insolación y la capacidad de generación de energía eléctrica.

Hernández Calzada (2012) afirma que las instalaciones fotovoltaicas son frecuentemente subutilizadas debido a que las necesidades de riego son mayormente estacionales, mientras que la producción fotovoltaica se da a lo largo de todo el año. Este hecho extiende los tiempos necesarios para la amortización del capital invertido.

Este trabajo tuvo por objetivo realizar una aproximación teórica de cálculo y dimensionamiento de un sistema de riego por goteo fotovoltaico para las condiciones agroecológicas y productivas de la zona del valle inferior del río Colorado. En esta región el agua para riego es tomada a nivel superficial del sistema de canales y acequias

3. Materiales y Métodos

3.1. Determinación de la demanda: Necesidades hídricas del cultivo de cebolla

Para estimar la necesidad de riego del cultivo de cebolla se consideró el valor de evapotranspiración mensual del cultivo (Etc), la cantidad mensual de días de riego (nDr), la duración del ciclo del cultivo y las precipitaciones (Precip.), reportadas por Sanchez (2012) presentados en la Tabla 1.

Tabla 1: Principales variables de riego del cultivo de cebolla: nDr: número mensual de días de riego; ETC: Evapotranspiración del cultivo; Pricip.: Precipitaciones.

	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Total
nDr (días)	20	31	30	31	30	31	31	28	-	-	-	-	225,0
Etc (mm)	8,2	15,2	26,1	68,8	142,4	185,1	188,7	79,6	-	-	-	-	714,0
Precip (mm)	10,1	13,2	20,9	19,3	24,0	16,3	18,9	18,8	-	-	-	-	141,5

El caudal de riego mensual (Qr), se calculó afectando el valor de Etc mensual por el coeficiente de corrección de condiciones climáticas (Cp = 1,20) informado por Hernández Abreu (1987), el coeficiente de necesidad de lavado de sales (Cls= 1,28) estimado de acuerdo a la metodología propuesta por Pizarro Cabello (1996) y el coeficiente de uniformidad de aplicación (Cu = 0,9) estimado por Cun Gonzalez et al. (2011) (Ecuación 1).

Ecuación 1

$$Qr = \frac{Etc \cdot 10 \cdot Cp \cdot Cls}{Cu}$$

donde, Qr se expresa en m³/ha.mes, Etc se expresa en mm, los coeficientes son adimensionales y la constante 10 se expresa en m³/ha.mes.mm.

De acuerdo a las estimaciones de Sanchez (2012), los aportes de agua provenientes de precipitaciones en los meses de mayor demanda, representan apenas el 1 % de la lámina de agua evapotranspirada en los meses de Diciembre y Enero. El mínimo impacto que pudiera tener la lluvia y la baja probabilidad de ocurrencia hacen despreciable el aporte para el cálculo de dimensionamiento.

El caudal mensual para una superficie determinada se calculó multiplicando el caudal de riego Qr por la superficie afectada según la Ecuación 2.

Ecuación 2

$$Qm = Qr \cdot Sup$$

donde, Qr se expresa en m³/ha.mes y la superficie en ha.

El caudal de aplicación diario se determinó dividiendo el caudal mensual (Qm) por la cantidad de días de riego (nDr) del mes correspondiente (Ecuación 3).

$$Qd = \frac{Qm}{nDr}$$

donde, Qm se expresa en m³/mes y nDr en días/mes.

3.2. Determinación de la oferta de radiación solar

La información de la disponibilidad de energía solar (Tabla 2), se obtuvo del atlas solar de la NASA (2016), para el plano horizontal y las coordenadas latitud -39,00; longitud -62,00.

Tabla 2: Valores de radiación incidente sobre el plano horizontal

	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
Radiación (Kwh/m² día)	2,16	3,00	4,24	5,50	6,77	7,19	7,12	6,42	4,88	3,51	2,44	1,88

Con estos valores quedó también definida la cantidad de horas solar pico (Hsp). Hsp es una medida de radiación y se define como el tiempo en horas de una hipotética irradiancia solar constante de 1000 W/m². Un día con una radiación de 5 Kwh/m²día presenta un valor de 5 Hsp.

3.3. Dimensionamiento del sistema de generación de energía

La energía hidráulica diaria (Eh) se calculó según la Ecuación 4.

$$Eh = \frac{g \cdot \rho \cdot Qd \cdot H}{3600}$$

donde, Eh se expresa en Wh/día, ρ es la densidad teórica del agua (1000 Kg/m³), g es la aceleración de la gravedad (9,8 m/s²), Qd se expresa en m³/día y H es la altura manométrica expresada en m.

De acuerdo con Cuadros et al. (2004) y Lopez Rodriguez et al. (2005), la energía de generación diaria (Egd) se calculó según la Ecuación 5, considerando las pérdidas de carga por fricción en la conducción (R), la fracción diaria durante la cual la radiación solar es inferior al umbral al cual la bomba comienza a trabajar (Gd), el rendimiento del generador fotovoltaico (μg) el rendimiento del convertidor de corriente continua a alterna (μi) y el rendimiento de la bomba (μb).

$$Egd = \frac{Eh + R}{Gd \cdot \mu g \cdot \mu i \cdot \mu b * 1000}$$

donde, Egd se expresa en KWh/día, Eh y R se expresan en Wh/día y los demás términos son adimensionales.

De acuerdo con Lorenzo (1994), en condiciones normales R representa el 10% de Eh. Este autor también informa los siguientes niveles de eficiencia: Gd=0,95, μg=0,85, μi=0,9 y μb=0,43.

Expresado en porcentaje, el producto de todos los rendimientos del sistema da lugar a un rendimiento global de 31,26%. Valores similares fueron reportados por Kelley et al. 2010.

La potencia necesaria del generador fotovoltaico es la razón entre la energía de generación requerida y la cantidad de horas de radiación a 1000 w/m² (Ecuación 6).

$$Ng = \frac{Egd}{Hsp * 1000} \quad \text{Ecuación 6}$$

donde, Egd se expresa en KWh/día, y Hsp en h/día.

La cantidad de paneles necesarios es el cociente entre la potencia de generación del sistema (Ng) y la potencia nominal del panel (Nn) (Ecuación 7).

$$nP = \frac{Ng}{Nn} \quad \text{Ecuación 7}$$

donde, Ng y Nn se expresan en KW.

3.4. Balance energético y armonización del sistema

La potencia instalada se calculó multiplicando la potencia nominal de los paneles (Nn) por la cantidad máxima de paneles nP_{max}. (Ecuación 8).

$$Ni = nP_{max} . Nn \quad \text{Ecuación 8}$$

donde, Nn se expresan en KW.

La energía total diaria producida por el sistema se calculó multiplicando la potencia instalada (Ni) por el número de horas solar pico (Ecuación 9).

$$Etd = Ni . Hsp \quad \text{Ecuación 9}$$

donde, Ni se expresa en KW y Hsp en h/día.

La energía total mensual (Etm) generada se calculó multiplicando la Energía total diaria (Etd) por la cantidad de días del mes (nD) (Ecuación 10).

$$Etm = Etd . nD \quad \text{Ecuación 10}$$

donde, Etd se expresa en KWh/día y nD en días/mes.

Dado que en algunos meses la afectación de días de riego no abarca el periodo completo, se realizó el balance energético para periodos mensuales. Para ello se calculó la energía de generación mensual multiplicando la energía de generación diaria (Egd), por la cantidad de días de riego (nDr) acuerdo a la Ecuación 11.

$$Egm = Egd \cdot nDr$$

donde, Egd se expresa en KWh/día y nDr en días/mes.

La energía remanente mensual (Erm) se calculó de la diferencia entre la energía total mensual (Etm) y la energía de generación mensual (Egm) según la Ecuación 12.

$$Erm = Etm - Egm$$

donde, todos los términos se expresan en KWh/mes.

El porcentaje de energía remanente mensual %Erm se calculó según la Ecuación 13.

$$\%Erm = \frac{Erm}{\sum Etm} \cdot 100$$

donde, $\sum Etm$ es la sumatoria de la total mensual a lo largo del año expresada en KWh/año.

De acuerdo con Lopez Rodriguez et al. (2005), el porcentaje de cobertura (%Cob) es la relación porcentual entre las sumatorias anuales de energía total producida y energía de generación demandada. (Ecuación 14). Esta variable permite conocer en cierta medida el balance energético global del sistema.

$$\%Cob = \frac{\sum Etm}{\sum Egm} \cdot 100$$

donde, $\sum Egm$ y $\sum Etm$ son las sumatorias de la energía de generación mensual y la energía total mensual a lo largo del año expresadas en KWh/año.

El porcentaje de cobertura efectivo (%Cob.ef) es la relación porcentual entre las sumatorias anuales de energía de generación utilizada en cada mes y la energía total. (Ecuación 15). Esta variable permite conocer el balance energético global del sistema, bajo la condición de que no es posible acumular y transferir excedentes energéticos de un mes a otro.

$$\%Cob.ef = \frac{\sum Etm - \sum Erm}{\sum Egm} \cdot 100$$

donde, $\sum Egm$, $\sum Erm$ y $\sum Etm$ son las sumatorias de la energía de generación mensual, la energía remanente mensual y la energía total mensual a lo largo del año, expresadas en KWh/año.

A los fines de analizar las diferentes alternativas de dimensionamiento del sistema se consideró el dimensionamiento de un reservorio de agua con la capacidad de acumular los excedentes para ser aprovechados en el periodo de mayor demanda. La capacidad del reservorio se calculó de acuerdo a la Ecuación 16.

$$CR = Qt \cdot \left(1 - \frac{\% Cob.ef}{100}\right)$$

4. Resultados y discusión

4.1. Dimensionamiento del sistema

En la Tabla 3 se presentan los parámetros técnicos con que se realizaron los cálculos. Los valores de coeficientes de eficiencia fueron informados en el apartado *Dimensionamiento del sistema de generación de energía* del capítulo *Materiales y métodos*.

Tabla 3: Valores de los principales parámetros técnicos.

Altura de elevación (h) desde el canal	1 m	
Presión de salida (p)	2 Kg/cm ²	
Altura manométrica total (H)	22 m	H= h+p
Superficie (Sup)	10000 m ²	
Potencia nominal panel solar (Nn)	0,15 KW	

Tabla 4: Valores de los principales parámetros de riego. **nDr:** número de días de riego; **Hsp:** horas solar pico; **Qr:** caudal de riego; **Qm:** caudal mensual de riego; **%Qm:** porcentaje del caudal mensual de riego respecto del total anual. **Qd:** caudal diario de riego; **Eh:** energía hidráulica, **Egd:** energía de generación diaria; **Ng:** potencia de generación; **nP:** número de paneles. **nP_{max}** = número máximo de paneles.

Mes	nDr (días)	Hsp	Qr = Qm (m ³ /ha.mes)	%Qm (%)	Qd (m ³ /día)	Eh (Wh/día)	Egd (KWh/día)	Ng (KW)	nP
Jul.	20	2,2	139,43	1,14	6,97	417,52	1,42	0,69	4,39
Ago.	31	3,0	258,76	2,12	8,35	499,91	1,70	0,57	3,78
Sept.	30	4,2	445,38	3,65	14,85	889,15	3,03	0,71	4,76
Oct.	31	5,5	1173,93	9,63	37,87	2267,94	7,72	1,40	9,36
Nov.	30	6,8	2429,52	19,94	80,89	4850,15	16,52	2,44	16,27
Dic.	31	7,2	3159,30	25,93	101,91	6103,46	20,79	2,89	19,27
Ene.	30	7,1	3221,11	26,43	103,91	6222,94	21,19	2,98	18,84
Feb.	28	6,4	1358,36	11,15	48,51	2905,34	9,89	1,54	10,27
Mar.	0	4,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Abr.	0	3,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
May.	0	2,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Jun.	0	1,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	233		Qt = 12185,79	100					nP_{max} = 20

De acuerdo a los resultados presentados en la Tabla 4 resulta evidente la alta concentración de la demanda de agua en un periodo acotado de tiempo. Los meses de Noviembre, Diciembre y Enero concentran más del 70% del caudal de riego aportado en todo el ciclo del cultivo.

Este desempeño repercutió en gran medida en la magnitud del rango de la variable nP. Aun cuando el número de Hsp de Diciembre es 2,4 veces superior al observado en Agosto, la relación en la potencia de generación para estos dos meses es aún superior. Se requieren 5,25 veces más potencia en Enero que en Agosto.

4.2. Balance energético y armonización del sistema

Como punto de partida del análisis se consideró un sistema totalmente aislado y sin dispositivos de acumulación de energía. Por lo cual fue necesario contar con una unidad de generación compatible con el máximo requerimiento puntual observado en los meses de Diciembre y Enero.

En la Tabla 5 se presenta el balance energético sobre la base de una unidad de generación de 3 KW.

Tabla 5: Balance energético para un sistema de captación de energía de 20 paneles de 150W. **nD:** números de días del mes; **nDr:** número de días de riego; **Ni:** potencia instalada; **Etd:** energía total diaria, **Etm:** energía total mensual; **Egm:** energía de generación mensual; **Erm:** energía remanente mensual; **%Erm:** porcentaje de energía remanente respecto de la Σ Etm; **% Cob.ef:** porcentaje de cobertura efectivo.

Mes	nD (días/mes)	nDr (días/mes)	Ni (KW)	Etd (KWh/día)	Etm (KWh/mes)	Egm (KWh/mes)	Erm (KWh/mes)	%Erm (%)
Jul.	31	20	3,00	6,48	200,88	28,44	172,44	3,44
Ago.	31	31	3,00	9,00	279,00	52,78	226,22	4,51
Sept.	30	30	3,00	12,72	381,60	90,84	290,76	5,79
Oct.	31	31	3,00	16,50	511,50	239,43	272,07	5,42
Nov.	30	30	3,00	18,48	609,30	495,52	113,78	2,27
Dic.	31	31	3,00	19,63	668,67	644,36	24,31	0,48
Ene.	30	30	3,00	19,43	662,16	656,96	5,20	0,10
Feb.	28	28	3,00	17,53	539,28	277,04	262,24	5,23
Mar.	31	0	3,00	14,64	453,84	0,0	453,84	9,04
Abr.	30	0	3,00	10,53	315,90	0,0	315,90	6,30
May.	30	0	3,00	7,32	226,92	0,0	226,92	4,52
Jun.	30	0	3,00	5,64	169,20	0,0	169,20	3,37
Σ	365	233			5018,25	2485,36	+2532,89	+50,47
					% Cobertura = 201,91		-0	-0
					%Cob.ef = 100			

De acuerdo a los resultados presentados en la Tabla 5, el % de cobertura fue del 200%. La potencia instalada generó el doble de la energía requerida y la mitad de ese remanente se da entre Marzo y Junio, periodo en que no se riega porque está fuera del ciclo del cultivo. Otra gran proporción de este remanente se genera entre Julio y Octubre donde los caudales de riego son relativamente bajos.

De acuerdo con López Rodríguez et al. (2005), la capacidad instalada óptima es aquella que alcanza un porcentaje de cobertura del 100%. Sin embargo una reducción en la potencia instalada dará lugar a déficits energéticos puntuales en el periodo crítico del cultivo que necesariamente deben cubrirse.

Las alternativas técnicas para cubrir esos desfases están dadas por el aporte de energía a partir de fuentes complementarias externas al sistema o la incorporación de

dispositivos capaces de almacenar energía en una batería de acumuladores o en reservorios suficientemente elevados.

Considerando el supuesto de que técnicamente no es sencillo ni económico almacenar los excedentes de energía es preciso encontrar un punto de equilibrio entre la capacidad instalada del generador y la magnitud de los déficits que se deberán cubrir.

En la Figura 1 se presentan las curvas de Etm y Egm para diferentes niveles de potencia instalada (Ni) a lo largo del año. En términos de magnitud las mayores diferencias en la energía generada se dan en los meses de mayor oferta de radiación. A medida que se reduce Ni las curvas adquieren formas más planas.

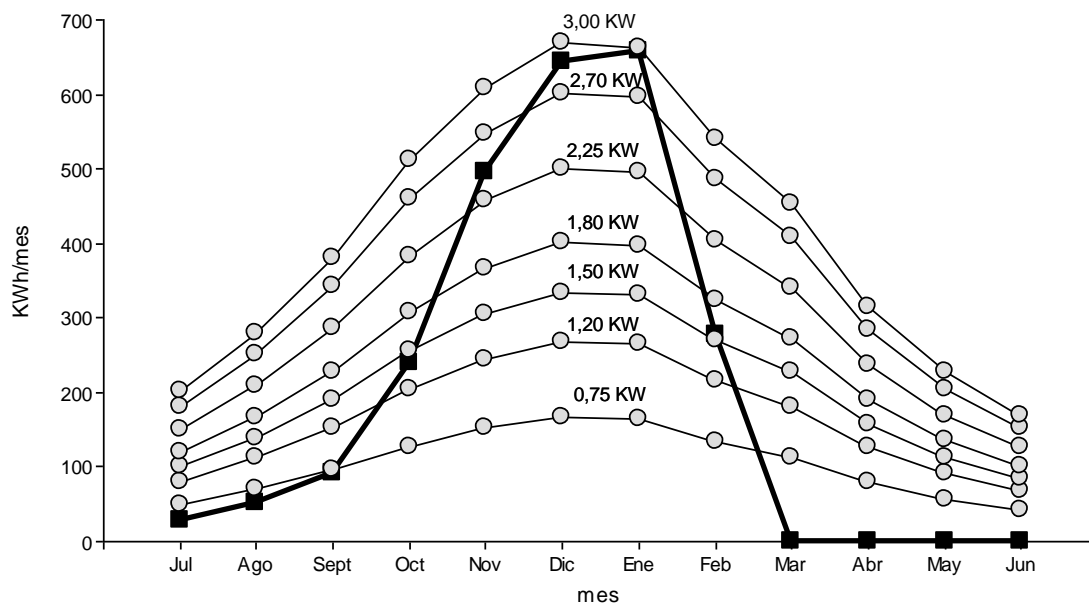


Figura 1: Variación de la demanda de energía de generación mensual (cuadrado) y la energía de total mensual (circulo) producida a lo largo del año para diferentes valores de potencia instalada.

En la Tabla 6 se presentan los porcentajes de cobertura y cobertura efectiva en relación a la potencia instalada.

Tabla 6: Eficiencia del sistema de riego fotovoltaico en función de la potencia instalada. Ni: potencia instalada; nP: número de paneles, %Ni: porcentaje de potencia instalada respecto de la capacidad máxima; %Cob.ef: porcentaje de cobertura efectiva.

Ni (KW)	nP	%Ni	% Cobertura	%Cobertura/%Ni	%Cob.ef.	%Cob.ef/%Ni
3,00	20	100,00	201,91	2,02	100,79	0,99
2,70	18	90,00	181,70	2,02	95,83	1,06
2,25	15	75,00	151,43	2,02	86,25	1,14
1,80	12	60,00	121,15	2,02	74,54	1,23
1,50	10	50,00	100,96	2,02	66,44	1,32
1,20	8	40,00	80,76	2,02	55,06	1,37
0,75	5	25,00	50,48	2,02	37,01	1,47

La reducción en el porcentaje de cobertura se da en la misma proporción que el porcentaje de potencia instalada. Sin embargo, no ocurre lo mismo con el porcentaje de cobertura efectivo. La razón entre esta variable y el porcentaje de potencia instalada tiene un cociente mayor a medida que la capacidad instalada es menor.

Este comportamiento puede explicarse por una reducción en los valores de energía remanente producida en cada caso. En cierta medida, la eficiencia del sistema aumenta con la disminución de la potencia instalada, lo que hace factible cubrir una mayor parte de la demanda con un sistema de tamaño en proporción menor (Figura 2).

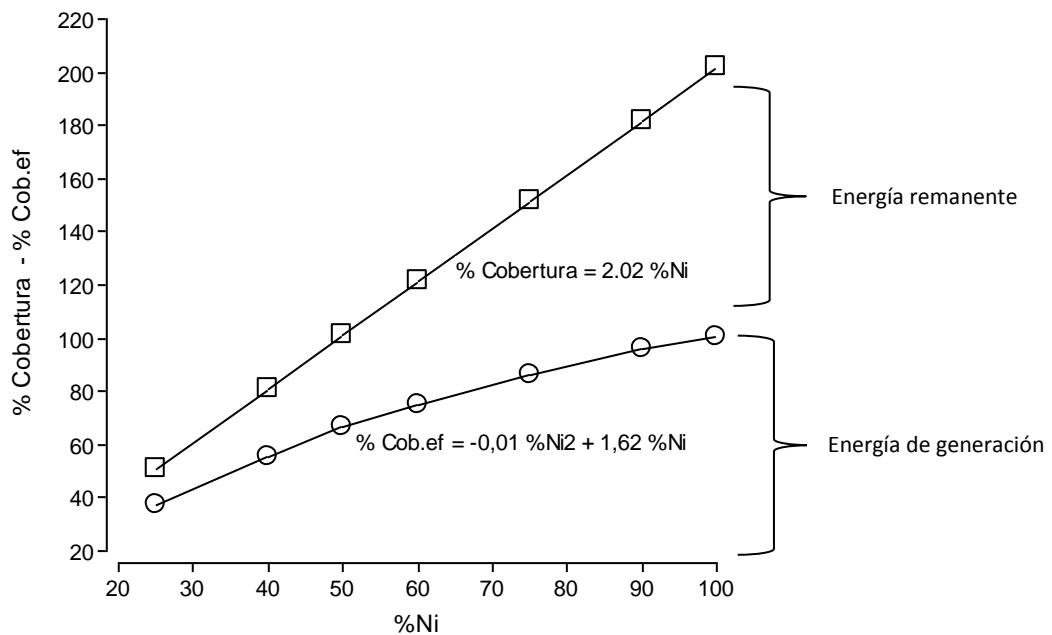


Figura 2: Variación del porcentaje de cobertura (% Cobertura: cuadrado) y del porcentaje de cobertura efectivo (%Cob.ef: circulo) en función del porcentaje de potencia instalada (% deNi).

Estas prestaciones permiten estudiar la conveniencia de las alternativas que logren mayor equilibrio entre la capacidad instalada, que tiene un gran impacto en la inversión inicial, y el porcentaje de cobertura efectiva.

Un sistema de 1,5 KW, puede abastecer el 66% de la demanda total del sistema, cubriendo cerca de la mitad de la demanda pico instantánea de los meses de Diciembre y Enero. Permite lograr un porcentaje de cobertura del 100%, pero requiere de un sistema de acumulación de energía.

Tabla 7: Balance energético para un sistema de captación de energía de 10 paneles de 150W. **nD:** números de días del mes; **nDr:** número de días de riego; **Ni:** potencia instalada; **Etd:** energía total diaria, **Etm:** energía total mensual; **Egm:** energía de generación mensual; **Erm:** energía remanente mensual; **%Erm:** porcentaje de energía remanente respecto de la Σ Etm; **% Cob.ef:** porcentaje de cobertura efectivo.

Mes	nD (días/mes)	nDr (días/mes)	Ni (KW)	Etm (KWh/mes)	Egm (KWh/mes)	Erm (KWh/mes)	%Erm (%)
Jul.	31	20	1,50	100,44	28,44	72,00	2,87
Ago.	31	31	1,50	139,50	52,78	86,72	3,46
Sept.	30	30	1,50	190,80	90,84	99,96	3,98
Oct.	31	31	1,50	255,75	239,43	16,32	0,65
Nov.	30	30	1,50	304,65	495,52	-190,87	-7,61
Dic.	31	31	1,50	334,34	644,36	-310,02	-12,36
Ene.	30	30	1,50	331,08	656,96	-325,88	-12,99
Feb.	28	28	1,50	269,64	277,04	-7,40	-0,29
Mar.	31	0	1,50	226,92	0,0	226,92	9,04
Abr.	30	0	1,50	157,95	0,0	157,95	6,30
May.	30	0	1,50	113,46	0,0	113,46	4,52
Jun.	30	0	1,50	84,60	0,0	84,60	3,37
Σ	365	233		2509,13	2485,36	+857,00	+34,19
				% Cobertura = 102,07 %Cob.ef = 66,54		-834,17	-33,25

Para esta potencia, el balance energético global de todo el año resultó equilibrado como lo indica el porcentaje de cobertura (Tabla 7). El balance para la Erm es positivo entre Marzo y Octubre, y negativo entre Noviembre y Febrero. En términos de magnitud, ambos saldos son de aproximadamente 850KWh. El análisis desagregado del déficit energético permite observar que el sistema está en equilibrio con los requerimientos de Octubre y Febrero; y cubre el 60% de la demanda de Noviembre y el 50% de la Diciembre y Enero.

En base a estos resultados, es posible asumir que las instalaciones que alcancen un porcentaje de cobertura efectivo de entre 55% y 75% presentan un nivel aceptable de eficiencia y permiten cubrir una gran proporción de la demanda de cada mes.

Sin embargo es necesario considerar las diferentes estrategias tecnológicas para la provisión de energía a lo largo del periodo de déficit. En este sentido se presentan dos alternativas: acumulación de excedentes y provisión desde fuentes alternativas.

4.3. Alternativas tecnológicas para cubrir el déficit energético

Acumulación de energía (sistema cerrado "off grid")

Para el dimensionamiento del reservorio de agua es necesario considerar dos variables: Altura de elevación y capacidad.

Descontando las pérdidas por fricción de la bomba y los menores requerimientos de filtrado del agua depositada en un alojamiento estanco, la altura de elevación necesaria se estima en un 50% de la altura manométrica establecida en la Tabla 3. Considerando un valor de H de 22m, la altura mínima de elevación del reservorio es de 11m.

Considerando que el caudal total de riego (Q_t) es de aproximadamente 12200 m³ (Tabla 4), la capacidad mínima del reservorio calculada de acuerdo a la Ecuación 16, es de 4100 m³. Sobre este volumen, se debe computar la pérdida por evaporación.

La acumulación de energía excedente generada dentro de un sistema cerrado mediante el uso de reservorios de agua elevados, implica una inversión inicial en infraestructura fija, que se suma a la necesaria para la adquisición del sistema de generación propiamente dicho. Para ello es preciso considerar que la concentración temporal de los periodos de déficit y excesos impide la alternancia de ciclos de carga y descarga más frecuentes y de menor magnitud. Este comportamiento requiere el dimensionamiento de un dispositivo de gran capacidad.

Las obras de infraestructura necesarias para la reserva de agua en altura, limitan la movilidad del sistema, reduciendo la posibilidad del riego a superficies cercanas a la instalación. Este hecho resulta una limitante para la adopción de la tecnología en su conjunto dado que el cultivo de cebolla requiere una rotación frecuente a lotes sin historia reciente del cultivo.

Incorporación de energía desde fuentes externas (sistema abierto "on grid")

La incorporación de energía a partir de fuentes externas como la red eléctrica o los combustibles, va a repercutir en los costos variables destinados a solventar la energía incorporada y los gastos de mantenimiento en el caso de que se empleen motores para la generación in situ. Como contrapartida estas alternativas reducen la inversión inicial y dan cierta movilidad a todo el sistema.

En el caso particular de la red eléctrica las mayores limitaciones estarán dadas por el alcance de la red de electrificación rural para abastecer al sistema en diferentes puntos de la región.

Como surge de la Tabla 7 el déficit energético para el sistema de 1,5 KW es de aproximadamente 850 KWh y se extiende a lo largo de 90 días. Considerando el mes de enero, el déficit diario es de 10,86 KWh/día.

Un aspecto común a las alternativas de utilización de energía acumulada o proveniente de fuentes externas, es que permiten extender los tiempos de riego más allá del periodo en que se da la oferta de radiación. Con ello se reduce sensiblemente la capacidad de la bomba requerida y las secciones del circuito hidráulico involucrado en la conducción hasta las líneas de goteo.

5. Conclusiones

El tamaño del sistema de captación de energía es una relación de compromiso entre la demanda de energía y la oferta de radiación. Independientemente de la cantidad total de energía puesto en juego en un ciclo de cultivo, la potencia del sistema instalado será menor cuando mayor sea la coincidencia entre estas dos variables a lo largo de todo el ciclo del cultivo.

La capacidad de los reservorios u otro sistema de acumulación de energía remanente estará limitada por la periodicidad en la alternancia de ciclos de carga y descarga, independientemente de la cantidad de energía acumulada a lo largo del año.

La discordancia observada entre la demanda hídrica del cultivo de cebolla y la oferta de radiación para la región del valle bonaerense del río Colorado redundan en un incremento de la potencia instalada necesaria para la captación de energía.

La estacionalidad del cultivo y la concentración en el tiempo de la demanda de agua observada para el cultivo de cebolla contribuye al incremento de las dimensiones de los reservorios

Considerando las condiciones evaluadas en este caso de estudio, la potencia de la instalación fotovoltaica necesaria para suplir las necesidades de riego es de 3KW. Sin embargo se considera que un sistema de generación de 1,5KW complementado con la provisión de energía a partir de otras fuentes resulta más eficiente en función de la capacidad instalada.

Esta configuración *on grid* que aporta el 66% de la energía necesaria otorga cierta flexibilidad al sistema en su conjunto, confiere capacidad de respuesta frente a excesos de demanda puntuales y hace posible ampliar los tiempos de riego a periodos nocturnos.

Agradecimiento

Al Ing. PhD. Alejandro Oliva, por las sugerencias y aportes realizados al trabajo.

6. Bibliografía

- CORFO 2012. Corporación de Fomento del Valle Bonaerense del Río Colorado. Informe institucional. Disponible web: <http://www.corforicolorado.gov.ar/>
- Cuadros, F; Lopez Rodríguez, F; Marcos, A; Coello, J. 2004. A procedure to size-powered irrigation (photoirrigation) schemes. *Solar Energy* v: 76 p: 465 - 473. Disponible Web: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X03004195>.
- Cun González R; Puig Estrada, O; Morales, C. Duarte Díaz, C. 2011. Evaluación de la uniformidad del riego por goteo en condiciones de casas de cultivo en explotación. *Rev Cie Téc Agr v.20 n.1 San José de las Lajas*. Disponible web: <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v20n1/rcta07111.pdf>
- Hernández Abreu, J; Lopez, .; Regalado, A; Hernandez, J. 1987. El riego localizado. Madrid: Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias.
- Gavilán, P; Ruiz, N; Lozano, D; Bohórquez, J; Molina, F. 2015. Efecto de la frecuencia de riego sobre la eficiencia del riego y la producción de un cultivo de fresa. XXXIII Congreso Nacional de Riegos Universitat Politècnica de València, Valencia 2015.
- Gao, X; Jiahong, L; Juan, Z; Jinyue, Y; Shunju, B; He, X; Tao, Q. 2013. Feasibility evaluation of solar photovoltaic pumping irrigation system based on analysis of dynamic variation of groundwater table. *Applied Energy* v: 105 p: 182 - 193. Disponible web: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261912008835>
- Hernández Calzada, J. 2012. Estudio del modelo energético de autoconsumo con balance neto para el riego agrícola mediante energía fotovoltaica. Trabajo fin de master de investigación en ingeniería para el desarrollo agroforestal. Univ de Valladolid. España. Disponible web: <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/1038>.
- Iurman, D. 2012. Aspectos del mercado de cebolla: Producción, exportación e importación. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Ediciones INTA. Junio 2012. Disponible web: http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-mercado_cebolla_junio_2012.pdf.
- Kelley, L; Gilbertson, E; Sheikh, A; Eppinger, S; Dubowsky, S. 2010. On the feasibility of solar-powered irrigation. *Renew Sustain Energy Rev.* v:14 p: 2669 - 2682 Disponible web: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110002418>.
- Lopez Rodríguez, F; Marcos, A; Moral, F; Silos, I; Cuadros, F. 2005. Cálculo informatizado de instalaciones solares fotovoltaicas (fotorriego) para riego de un olivar. Actas IX Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. 2005. Málaga. Asociación Española de Dirección e Ingeniería de Proyectos. Disponible web: http://www.aepro.com/files/congresos/2005malaga/ciip05_0112_0122.173.pdf
- Lorenzo, e. 1994. Electricidad solar. Ingeniería de los sistemas fotovoltaicos. Editorial PROGENSA. ISBN 9788486505455
- NASA. *National Aeronautics and Space Administration*. 2016. Atmospheric data center. Surface meteorology and Solar Energy. Web: <https://eosweb.larc.nasa.gov>
- Odeh, I; Yohanis, Y; Norton, B. 2006. Economic viability of photovoltaic water pumping systems. *Solar Energy* v: 80 p: 850 - 860.
- Pizarro Cabello, F. 1996. Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF). Goteo, microaspersión, exudación. 3ª edición revisada y ampliada. Ediciones Mundi-Prensa. 74-75 pp.

Sanchez, R. 2012. Estimación de los requerimientos hídricos de los principales cultivos en el valle bonaerense del río Colorado. Informe Técnico 40. ISSN: 0328-3399. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Ediciones INTA.

Disponible web: <http://inta.gob.ar/documentos/estimacion-de-los-requerimientos-hidricos-de-los-cultivos-en-el-valle-bonaerense-del-rio-colorado>.

Zvonimir, G; Jure, M. 2007. A model for optimal sizing of photovoltaic irrigation water pumping systems. Solar Energy v: 81 p: 904 – 916

Disponible web: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X06002866>

En el valle bonaerense del río Colorado las prácticas habituales de riego gravitacional tienen una eficiencia del 50%. La principal actividad productiva de la zona es el cultivo de cebolla sobre una superficie de 13 000 ha. La adopción de técnicas de riego más eficientes está condicionada a la provisión de energía y al impacto económico que este servicio tenga en la rentabilidad de la actividad. Se ha demostrado que la energía fotovoltaica presenta numerosas ventajas para ser aplicada al riego, pero no se cuenta con información de sistemas aplicados al cultivo de cebolla. En base a la metodología propuesta por diferentes autores, se realizó el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico para el riego por goteo de cebolla que permite alcanzar una eficiencia en el uso del agua de 90%. El dimensionamiento realizado permitió establecer que la potencia instalada para un sistema de generación cerrado es de 3KW. Sin embargo se concluye que la instalación de un sistema de 1,5 KW complementado con la provisión de energía a partir de otras fuentes, resulta más eficiente en función de la capacidad instalada.

Informe técnico de la E. E. A. Hilario Ascasubi N° 48
ISSN 0328-3399



Ministerio de Agroindustria
Presidencia de la Nación