



# Instalaciones Fotovoltáicas para Riegos por Goteo

## INTRODUCCIÓN

Las ventajas que ofrece la utilización de energías renovables, y por tanto de la energía solar como una más de ellas, son sobradamente conocidas y fruto precisamente del carácter renovable de los distintos recursos energéticos que emplean, lo que reduce la explotación del medio natural y ayuda a la conservación del medio ambiente, y del carácter distribuido del recurso energético, lo que permite una producción localizada y consecuentemente una disminución de la dependencia energética externa y por tanto un mayor grado de autonomía energética. Es por ello que desde las distintas instituciones de nuestro entorno se potencia el desarrollo de

\* Grupo de Energías Renovables del Dpto de Proyectos e Ingeniería Rural de la U.P. Navarra.

## METODOLOGÍA PARA UN PROYECTO DESTINADO A SU ACONDICIONAMIENTO

las energías renovables como queda patente en los planes que en esta materia tienen en marcha la Unión Europea y España.

En el ámbito agrario el interés de la introducción de sistemas de conversión de energía solar para el accionamiento de sus procesos característicos se ve favorecido por la demanda de tipo distribuido y en muchas ocasiones alejada de fuentes energéticas convencionales, la facilidad de integración en el paisaje y la compensación medioambiental que puede ofrecerse a aquellos sectores de la socie-

Por: Torres J.L., Prieto E., De Blas M., García A.\*

dad que consideran la actividad agraria y en concreto a algunas de las actuaciones de ingeniería que son indispensables para su desarrollo como lesivas para el medioambiente.

De entre los procesos aludidos, el del bombeo de agua para riego tal vez sea el que ofrezca unas características más adecuadas para servir de avanzada a la incorporación de la energía solar fotovoltaica a la actividad agraria, ya que en muchos casos suma a las ventajas generales ya indicadas el acoplamiento entre oferta y demanda energéticas, lo que supone una economía de potencia instalada. No obstante el carácter estacional del funcionamiento del sistema de riego también supone un excedente energético en determinados periodos que debe ser tratado convenientemente.





Salida de agua bombeada desde un sistema fotovoltaico

## EVALUACIÓN DEL RECURSO ENERGÉTICO.

A la hora de proyectar una instalación de riego por goteo alimentada por energía solar son diversas las cuestiones que han de plantearse y las decisiones que deben tomarse en orden a llevar a cabo aquélla que atienda mejor las necesidades que se demandan.

En primer lugar ha de caracterizarse el recurso energético, para lo cual será preciso recurrir a los datos de radiación solar del lugar o de alguna estación meteorológica cercana, no obstante tales datos se recogen normalmente en forma de radiación solar global sobre plano horizontal (I), por lo que será necesaria la aplicación de modelos que permitan la conversión de ésta a radiación sobre plano inclinado, ya que en el supuesto de módulos planos estáticos o con inclinaciones estacionales la superficie captadora deberá inclinarse convenientemente. En este sentido Duffie y Beckman (1991) recogen los modelos propuestos por Liu-Jordan, Pére y Hay, Davies, Klucher, Reindl (HDKR) cuya adecuación a cada caso debería ser analizada con el fin de proceder a una buena estimación del recurso disponible, base del dimensionado posterior. En la práctica de muchas instalaciones tal adecuación no se analiza y en consecuencia pue-

de ocurrir que se parta de una base que, si bien no podría calificarse de falsa, al menos contiene un grado de error desconocido en cuanto a la energía disponible. El recurso a un modelo de evaluación de radiación solar sobre plano inclinado también deberá ser empleado si el sistema se diseña con la posibilidad de seguimiento del sol a uno o dos ejes, éste último especialmente indicado si se contempla la posibilidad de que el sistema de captación esté dotado de un subsistema de concentración elevada.

Dado que el rendimiento de conversión fotovoltaica se ve afectado de forma considerable por la temperatura, ésta es otra variable climática que debe ser considerada y que con frecuencia en los cálculos de instalaciones ya realizadas se olvida. Para ello Erbs, Klein y Beckman (1982) han propuesto un procedimiento de obtención de la temperatura media mensual horaria a largo plazo en función del índice de nubosidad y la temperatura media mensual y más recientemente Heinemann, Schumacher y Ossietzky (1996) han presentado una aproximación universal para la síntesis de temperaturas horarias mediante correlaciones cruzadas de temperatura y radiación. En relación con el índice de nubosidad, también debe ser establecido el valor diario del mismo que identifica al día

en cuestión, como cubierto en relación con el sistema fotovoltaico y la aplicación que se considere, y la estimación del número de días de tal tipo que se puedan presentar de manera consecutiva, lo que será un dato trascendental de cara al cálculo de los sistemas de acumulación que ofrezcan el grado de autonomía necesario a la instalación, si ésta se plantea de manera aislada.

## TIPOS DE SISTEMAS Y SUS COMPONENTES.

Una vez recopilados los datos meteorológicos indicados y efectuado su procesamiento adecuado, la siguiente cuestión que debe ser resuelta o la próxima decisión a tomar es, la del tipo de sistema que se desea en relación con su independencia de la red eléctrica, su grado de autonomía etc., pudiendo distinguir en un primer nivel entre:

- \* Sistemas aislados de la red eléctrica carentes de acumulación.
- \* Sistemas aislados de la red eléctrica con acumulación en baterías.
- \* Sistemas conectados a red.

En la selección del sistema más adecuado entran en juego consideraciones de modo de funcionamiento del sistema, así Castillo, De Francisco y Torres, (1985) desarrollaron un sistema de riego por goteo de frutales con el criterio de que solo se regara cuando hubiera radiación solar disponible quedando la capacidad de acumulación energética reducida a la necesaria para tamponar la tensión de la instalación, consideraciones en cuanto a la peligrosidad del desabastecimiento de la carga, consideraciones de tipo económico o consideraciones de política energética y medioambiental como sucede en los casos de grandes plantas de producción de electricidad de carácter fotovoltaico. En todo caso un aspecto a investigar, con independencia del planteamiento político, es el del establecimiento de una metodología que con la incorporación de los datos de entrada normalmente disponibles, facilite la toma de decisión en relación con este asunto. En esta línea han sido desarrollados diversos trabajos como es el caso del método simplificado propuesto por Weidele, Pruscheck y Rauh



(1996) en relación con la optimización económica de sistemas fotovoltaicos conectados a red.

Los sistemas citados se refieren a alimentación energética de origen solar directo exclusivamente, no obstante serían posibles otros sistemas denominados normalmente híbridos como son el solar-eólico, o el solar-diesel de los que existe amplia bibliografía.

Independientemente del tipo de sistema que se decida en el nivel anterior, en un segundo nivel ha de definirse si la captación se realizará por medio de módulos planos, lo que es habitual, o se recurrirá al empleo de sistemas de concentración. En este caso, teniendo en cuenta el destino que se está contemplando de la energía generada y la disponibilidad en el mercado de células fotovoltaicas de concentración, lo más adecuado sería probablemente ir a sistemas de baja concentración, fundamentalmente con concentradores parabólicos compuestos Winston (1974,1975) que presentan la mayor concentración para una aceptación dada. Asimismo otro aspecto a contemplar es si se dotará a los módulos planos o concentradores de algún sistema de seguimiento del sol. En este sentido se hace imprescindible una correcta valoración, no siempre bien resuelta en muchas de las instalaciones, del beneficio energético que se obtiene con tales seguidores, frente al mayor coste de instalación y mantenimiento que suponen. Como ya se ha indicado este aspecto está en íntima relación con el de la caracterización y evaluación del recurso energético.

Si se tiene en cuenta que el dispositivo que va a realizar la conversión de energía solar a eléctrica es la célula solar, de la que existen distintas tecnologías, un tema más de análisis es el del tipo de material fotovoltaico (silicio) de base (monocrystalino, multicristalino, policristalino o amorfo) y su grado de integración, esto es, el tipo de módulos a emplear e incluso las asociaciones más convenientes entre éstos, dadas las pérdidas en tales asociaciones como consecuencia de la dispersión en cuanto a las características técnicas de los distintos módulos de una misma serie de fabri-

cación. Lo que lleva a otra cuestión normalmente olvidada como es la de la caracterización de los dispositivos fotovoltaicos que realmente se van a emplear en una instalación dada, la comprobación de sus especificaciones técnicas básicas como son: la intensidad de cortocircuito, tensión a circuito abierto, punto de máxima potencia y temperatura de operación normal de la célula bajo condiciones estándar y la modelización de aquéllos con vistas al conocimiento de su comportamiento en las diversas condiciones a las que con toda seguridad se verá sometido. En esta línea se dispone, entre otros, de los trabajos realizados por Otterbein y Evans (1980), Phang

de corriente alterna también debe ser evaluada, no solo desde el punto de vista de las ventajas e inconvenientes de los propios receptores (ya son conocidas las debilidades de los motores de corriente continua frente a los de alterna trifásicos) sino también en lo relativo a la evolución del punto de funcionamiento del sistema generador-motor. Appelbaum (1979,1981,1986,1987,1992), Akbaba (1995,1998) y Alghuwainem (1992) han estudiado distintos aspectos del acoplamiento directo del sistema fotovoltaico a motores, ya que esta cuestión, en muchos casos no valorada en el proyecto, incide directamente sobre la conveniencia de la uti-



Disposición de electroválvulas para el fraccionamiento de la superficie a regar y adecuación de la demanda a la oferta solar.

y otros (1984,1986), Townsend (1989), Akbaba y Alattawi (1995), que analizan modelos de complejidad decreciente que en todo caso merecerían ser contrastados frente a los módulos o campo fotovoltaico de cada instalación concreta mediante la medida in situ con el equipo adecuado de las características del campo en su conjunto.

Dado que la corriente eléctrica generada por vía fotovoltaica es de carácter continuo, la conveniencia de emplear receptores (en el caso de accionamiento de riego, motores) de corriente continua frente a receptores

de seguidores de punto de máxima potencia del sistema fotovoltaico y evidentemente sobre la necesidad de incorporar onduladores en el sistema de acondicionamiento de la señal. Así pues, si se trata de generar energía para el accionamiento de riegos de pequeña superficie, esta consideración debe ser analizada convenientemente. En todo caso opciones que han debido ser tomadas previamente afectan de modo decisivo a este asunto ya que por ejemplo si se ha optado por un sistema conectado a red es clara la necesidad de onduladores.



## ANÁLISIS DE LA CARGA DEMANDADA AL SISTEMA.

En las instalaciones aisladas su buen diseño no solo pasa por una correcta evaluación de la oferta energética del sistema de aprovechamiento solar, sino que también debe extenderse a la concienzuda caracterización de la carga, siendo de interés su distribución horaria a lo largo del día y eventualmente su distribución estacional. A pesar de que es el proceso productivo el que rige las líneas generales de tales distribuciones, conviene poner de manifiesto que ciertos aspectos básicos de proyecto pueden influir en las mismas, por ejemplo, puede decidirse a la hora de regar la to-

ción, partiendo de los datos de entrada que deben servir de referencia para los actuadores. Aquí los sensores juegan un papel primordial y del análisis de la respuesta de los cultivos a regar, bajo ciertas condiciones adversas en cuanto a disponibilidad hídrica, pueden extraerse conclusiones de interés a la hora de establecer, si así parece oportuno, umbrales admisibles de probabilidad de pérdida de carga. De hecho en algunos trabajos se ha evidenciado que controles simples con escasa información del sistema son inadecuados y no son capaces de garantizar la operación óptima del sistema e incluso producir el fallo prematuro de algunos de sus

## PROCEDIMIENTOS DE DIMENSIONAMIENTO.

El tipo de sistema elegido, la filosofía del proceso decidida, los datos de energía radiante de entrada y de demanda eléctrica calculados, el rendimiento del dispositivo fotovoltaico de conversión por el que se ha optado y los de los elementos de regulación y acondicionamiento de la señal son, inicialmente, parámetros de partida para el proceso de dimensionado del sistema que culminará con la determinación de la superficie captadora, la forma de interconexión entre los módulos en el campo (podría ser variable en función del criterio de dimensionado y la forma de regulación de la potencia de salida del campo fotovoltaico), el establecimiento de las especificaciones técnicas de los distintos equipos complementarios, en su caso con la determinación de la capacidad de almacenamiento en baterías y las estimaciones de la energía eléctrica producida, la aprovechada por la carga y, eventualmente, la comprada y vendida a la red.

A la hora de realizar el dimensionamiento también se abren distintas alternativas según el grado de complejidad y paralelamente de precisión que se desee. En muchos casos se utiliza el llamado método de horas de sol pico o de horas de sol equivalente que entre otros, puede hallarse en De Francisco y Castillo (1985). De aplicación muy sencilla adolece de un grado de simplificación excesivo que lleva a despreciar aspectos muy importantes del comportamiento del sistema fotovoltaico y de la propia naturaleza de la radiación solar, ambos extremos hacen que en un planteamiento científico y técnico riguroso, tal método deba ser descartado quedando su empleo reducido al establecimiento de ciertas magnitudes de partida para métodos más avanzados.

Dentro de estos últimos pueden citarse los de:

- \* Probabilidad de pérdida de carga
- \* Utilizabilidad

En el primero, descrito por Macomber y otros (1981) y empleado otros trabajos como los de Klein y Beckman (1987), se efectúa un balance diario entre la oferta del sistema so-



Area de Energías Alternativas. Paneles solares

talidad de una determinada superficie, o subdividirla en parcelas con los fines de disminuir las necesidades en cuanto a potencia instalada y prolongar el tiempo diario de funcionamiento del sistema, dando lugar a una carga más distribuida en el tiempo y posiblemente a un mayor grado de aprovechamiento del sistema solar. Esta cuestión enlaza con otra no menos importante como es la de la planificación y ejecución de la automatización y control del sistema de generación-bombeo-riego en su conjunto, de forma que dé respuesta práctica a la concepción del diseño de la instala-

componentes. Es por ello que la investigación en relación con distintos sensores que suministren información más o menos directa acerca de las necesidades hídricas puntuales de los cultivos (tensiómetros, sondas TDR y FDR, medidores de flujo de savia etc.), aquellos que detectan la radiación solar, temperatura y los niveles de tensión e intensidad de salida de partes o de la totalidad del campo fotovoltaico, son relevantes de cara a su integración en el esquema global de automatización y de regulación del sistema de abastecimiento energético.



lar y la demanda energética de la instalación de riego y, en su caso, una valoración diaria del estado de carga de la batería de acumulación. Cuando el balance es negativo y no existe capacidad suficiente en la batería, la demanda energética no podrá ser cubierta por el sistema fotovoltaico y si éste es de carácter aislado se producirá el fallo de la carga es decir no podrá regarse aunque en principio fuera necesario. Un análisis estadístico, extendido a un periodo significativo de funcionamiento del sistema, de los días en que se produce tal pérdida de carga, proporciona al final la probabilidad de pérdida de carga y si ésta no es admisible habrá que redimensionar la instalación, se trata pues de un proceso iterativo que se acerca a la realidad tanto de la carga como de la generación fotovoltaica y que si se desea se podría efectuar en una base horaria en lugar de diaria. Dentro de este método es obvio que un parámetro fundamental es la probabilidad de pérdida de carga admisible, que debería ser evaluada experimentalmente para la aplicación de riego por goteo que se está contemplando. De ahí la importancia a su vez del análisis de las experiencias con distintos sensores destinados a la evaluación de las necesidades hídricas de los cultivos y de los daños ocasionados por la eventual falta puntual de potencia en el bombeo.

Algunos autores como Barra y otros (1984), Bartoli y otros (1984), Bucciarelli (1984, 1986) y Lorenzo y otros (1994), han propuesto modelos analíticos que basados en el principio de la probabilidad de pérdida de carga, sustituyen el planteamiento numérico por la aplicación de sencillas expresiones que facilitan el trabajo al proyectista.

El segundo método parte de datos medios horarios mensuales de radiación solar y emplea un estadístico denominado utilizabilidad descrito por Clark, Klein y Beckman (1983, 1984), tratado también por Duffie y Beckman (1991) y Awanto y otros (1996) a la vez que utilizado en el programa de cálculo Pvfchart, con el que se evalúa, en primer lugar, la cantidad de energía solar que en cada hora de un mes dado se da en exceso de un de-

terminado nivel de radiación, denominado crítico, y definido como aquél para el cual la oferta solar iguala a la demanda de energía.

Por último cabe señalar que el interés de la alimentación de sistemas de bombeo con energía solar ha llevado

## REFERENCIAS.

ALGHUWAINEM S.M.: Steady-state performance of DC motors supplied from photovoltaic generators with a step-up converter, IEEE Trans. on Energy Conversion EC-7 (1992), pp. 267-272.

AKBABA, M.; ALATTAWI, M.A.A., "A new model for I-V characteristics of solar cell generators and its applications" Solar Energy Materials and Solar Cells 37 (2), 1995, pp.123-132.

AKBABA M., I. QAMBER, A. KAMAL, "Matching of separately excited DC motors to photovoltaic generators for maximum power output", Solar Energy 63 (6), 1998, pp. 375-385.

APPELBAUM J., BANY J., "Performance analysis of D.C. motor photovoltaic converter system-I", Solar Energy 22, 1979, pp.439-445.

APPELBAUM J., "Performance analysis of D.C. motor photovoltaic converter system-II", Solar Energy 27, 1981, pp.421-431.

APPELBAUM J., "Performance characteristics of a permanent magnet D.C. motor powered by solar cells", Solar Cells 17, 1986.

APPELBAUM J., "Starting and steady state characteristics of D.C. motors powered by solar cells generators", IEEE Trans. on Energy Conversion. 1 (1), enero 1986, pp.17-25.

APPELBAUM J., "The quality of load matching in a direct coupling photovoltaic system", IEEE Transactions on Energy Conversion 2 (4), Dic 1987.

APPELBAUM J., SINGER S., SARMA S.M., "Starting characteristics of permanent magnet and series excited motors powered by solar cells: variation with solar radiation and temperature", Electronic Machine and Power Systems, Jun. 1992, pp.173-181.

AWANTO C., ADJ M., VIANOU A., GIRARDEY A., "Sizing Procedure for Photovoltaic Refrigerating Systems Using a Simple Approach of the LLP Calculations" Solar Energy 56 (4), 1996, pp.337-342.

BARRA L., CATALANOTTI S., FONTANA F., LAVORANTE F., "An analytical method to determine the optimal size of a photovoltaic plant" Solar Energy 33 (6), 1984, pp. 509-514.

BARTOLI B., CUOMO V., FONTANA F., SERIO C., SILVERSTINI V., "The design of photovoltaic plants: An optimization procedure", Applied Energy 18, 1984, pp.37-47.

BELENOV A.T.: "Parameter selection and calculation for the water lift D.C. engine and solar battery", Applied Solar Energy 32(4), 1996, pp. 16-18.

BUCCIARELLI L. "Estimating loss-of-power probabilities of stand alone photovoltaic solar energy system", Solar Energy 32 (2), 1984, 205-209.

BUCCIARELLI L. "The effect of day-to-day correlation in solar radiation on the probability of loss of power in stand alone photovoltaic energy system", Solar Energy 36 (1), 1986, 11-14.

CASTILLO M., DE FRANCISCO A., TORRES J.L. "Proyecto de planta piloto de energía solar fotovoltaica para riego por goteo de 1 ha de frutales. Consejería de Fomento y Turismo de la Junta de Andalucía. 1985.

CLARK D.R., KLEIN S.A., BECKMAN W.A., "Algorithm for evaluating the hourly radiation utilizability function" ASME Journal of Solar Energy Engineering 105, 1983, pp. 281-287.

CLARK D.R., KLEIN S.A., BECKMAN W.A., "A method for estimating the performance of

a diversos investigadores a la realización de estudios sobre distintos aspectos del problema y así, aparte de los referidos con anterioridad, pueden citarse Martins y otros (1988), Belenov (1996), Hilmer y otros (1997) y Muljadi (1997),

photovoltaics systems" Solar Energy 33 (6), 1984, pp.551-555.

DE FRANCISCO A., CASTILLO M.: Energía solar. Diseño y dimensionamiento de instalaciones. Especial atención a las instalaciones de tipo agrario. Publicaciones del Monte de Piedad y Caja de Ahorros de Córdoba, 1985.

DE FRANCISCO A., CASTILLO M., TORRES J.L., La energía eléctrica en la explotación agraria y forestal, Mundi-prensa, Madrid, 1993.

DUFFIE J.A., BECKMAN W.A.: Solar Engineering of Thermal Processes, 2ª ed., Wiley Interscience, New York, 1991.

ERBS D.G., KLEIN S.A., BECKMAN W.A., "Estimation of degree-days and ambient temperature bin data from monthly average temperatures" ASHRAE Journal, Jun.1982, pp.60-65.

HEINEMANN D., SCHUMACHER J., "Synthesis of hourly ambient temperature time series correlated with solar radiation. Proc EuroSun '96. 1518-1523. 1996. Munich.

HILMER F., RATKA A., VAJEN H., ACKERMANN H., FUSH W., MELSHEIMER O., "Investigation of a directly coupled photovoltaic pumping system connector to a large absorber field" Solar Energy 61 (2), 1997, pp.65-76.

KLEIN S.A., BECKMAN S.A., "Loss of load probabilities for stand-alone photovoltaic systems" Solar Energy 39 (6), 1987, pp.499-512.

LORENZO E. y otros: Electricidad solar. Ingeniería de los sistemas fotovoltaicos, Progenisa, Sevilla, 1994.

MACOMBER H.L., RUZEK J.B., COSTELLO F.A. "Photovoltaic stand alone systems: preliminary engineering design handbook" NASA CR-165352, 1981.

MARTINS D.C., M. MEZARROBA, I.BARBI: "Water pumping system from photovoltaic cells using a current fed parallel resonant push-pull converter", PESC 98 Record 29th Annual IEEE Power Electronics Specialist Conference, 1988, pp.1892-1898.

MULJADI E., "PV water pumping with a peak power tracker using a simple six step square-wave inverter" IEEE Transactions of Industry Applications 33 (3), mayo/jun 1997, pp. 714-721.

OTTERBEIN R.T., EVANS D.L., "Two modified single diode models for simulating solar cells with distributed series resistance" 14th Photovoltaics Specialist Conference, 1980, pp.574-579.

PHANG, J.C.H., CHAN D.S.H. y PHILLIPS, J.R., "Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters", Electronic Letters 20 (10), 1984, pp.406-408.

PHANG, J.C.H., CHAN D.S.H.: "A review of curve fitting error criteria for solar cell I-V characteristics", Solar Cells 18, 1986, pp. 1-12.

TOWNSEND T.U.: A method for estimating the long-term performance of direct-coupled photovoltaic systems, University of Wisconsin, Madison, 1989.

WEIDLE Th., PRUSCHEK R., RAUH H.U., "Economic optimization of grid connected PV systems", Proc EuroSun '96. 934-939. 1996. Munich.

WINSTON R. "Principles of solar concentrators of a novel design", Solar Energy 16, 1974, pp 89-95.

WINSTON R., HINTERBERGER H. "Principles of cylindrical concentrators for solar energy", Solar Energy 17, 1975, pp 225-258.



# PreSiembra

**Roundup® PreSiembra™**

**ÚNICO EN EFICACIA  
MÍNIMO COSTE POR Ha.**



*Su campo listo para sembrar al mínimo coste por hectárea.*

El herbicida para presiembra  
más eficaz y rentable.