

Recibido: 04 de septiembre de 2015
Aceptado: 27 de octubre de 2015**SISTEMA SOLAR PARA LA OPERACIÓN DE UN ROBOT AGRÍCOLA****SOLAR SYSTEM FOR THE OPERATION OF A ROBOT AGRÍCOLA**

MSc. Diego Armando Mejía Bugallo, PhD. César Augusto Peña Cortés.
MSc. Cristian Ivan Riaño Jaimes.

Universidad de Pamplona, Programa de Ingeniería Mecatrónica
 Ciudadela Universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Tel.: (+577) 5685303, Fax: (+577) 5685303, Ext. 144.
 E-mail: damejia14@hotmail.com, {cesarapc, cristhian.riano}@unipamplona.edu.co

Resumen: En este artículo se presenta el diseño, desarrollo e implementación de un sistema solar completo a escala real, el cual consta de un seguidor solar tipo girasol con paneles fotovoltaicos que aumentan la cantidad de radiación solar recibida, y un sistema de control del punto de máxima potencia, el cual se basa en las curvas corriente-voltaje y potencia-voltaje que caracterizan los paneles fotovoltaicos para aumentar el rendimiento de los mismos. El sistema de generación de energía se encarga de alimentar un robot agrícola que ejecuta tareas de siembra, riego, fumigación, fertilización y recolección de plantas y frutos.

Palabras clave: Sistema fotovoltaico, sistema girasol, optimización de energía, robótica, agricultura

Abstract: This paper describes the design, development and implementation of a full-scale solar system, which consists of a sunflower type solar tracker with photovoltaic panels that increase the amount of solar radiation received, and a control system point of maximum power, which is based on the current-voltage and power-voltage curves that characterize the photovoltaic panels to increase the performance thereof. The power generation system is responsible for feeding an agricultural robot that performs tasks of planting, watering, spraying, fertilizing and harvesting of plants and fruits

Keywords: Photovoltaic system, sunflower system, energy optimization, robotics, agriculture.

1. INTRODUCCIÓN

Cada día la humanidad asume con mayor responsabilidad el rol que juega con respecto al medio ambiente. Se preocupa por reciclar sus basuras, por disminuir el consumo de agua, evitar la emisión de gases tóxicos, disminuir al máximo el consumo de energía en la casas, etc. Se ha comenzado a cambiar el paradigma que la automatización de procesos industriales o los desarrollos tecnológicos en vez de dañar el medio ambiente, contribuye de forma positiva al mismo.

Un buen ejemplo de este tipo de desarrollos tecnológicos son la generación energías renovables (Stone, 2011), dentro de las cuales se tienen: la energía solar (Zghal *et al*, 2012), energía eólica que aprovecha el viento (Jie *et al*, 2014), la energía geotérmica que toma el calor de la tierra (Nan *et al*, 2011), la energía mareomotriz obtenida de mares y océanos (Kazmierkowski y Jasinski, 2011), la energía azul basada en la llegada masas de agua dulce a masas de agua salada (Ross y Krijgsman, 2005), entre otras.

Otro tipo de tecnología que esta contribuyendo a mejorar diversos procesos industriales y de servicio son los robots. Estos optimizan el consumo de materiales tales como pegamentos, pintura, realizan tareas repetitivas con un bajo consumo energético, etc. Una rama de la robótica que ha tomado mucha fuerza es la robótica agrícola. Esta permite realizar cultivos a la intemperie, cultivos en ambientes estructurados tales como invernaderos, hidropónicos, aeropónicos e incluso una de las últimas tendencias que son los cultivos urbanos que permiten la siembra en fachadas, azoteas, paredes verticales, techos y otros.

Los robots agrícolas pueden realizar una serie tareas que van desde la preparación de los terrenos, la siembra, desyerbado, fumigación, fertilización, procedimientos de injertos, hasta la recolección, clasificación y empaque de frutos.

En este artículo se propone la combinación de estas dos tecnologías, haciendo uso de un sistema de generación de energía eléctrica fotovoltaico (solar) para alimentar un sistema robótico agrícola y de esta forma generar un proceso limpio, eficiente, económico y que colabore con el medio ambiente.

El artículo se encuentra organizado de la siguiente forma: en la sección 2 se presenta la arquitectura general del sistema, en la 3 el diseño del sistema de energía solar, en la sección 4 la descripción de sistema robótico y por último los resultados obtenidos y las conclusiones.

2. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

En la figura 1, se puede apreciar la arquitectura general del sistema agrícola propuesto. En primer lugar se cuenta con el sistema fotovoltaico de generación de energía, el cual alimenta al sistema robótico incluyendo su sistema de control.

El sistema robótico esta compuesto por un robot tipo antropomórfico de 5 grados de libertad, herramientas o efectores finales, dentro de los cuales se encuentran: palas, pinzas, rociadores, sembradores, aspersores para fumigación entre otros.

Cuenta con sensores de humedad para determinar las condiciones del sustrato y definir de forma conjunta con la información proporcionada por un sensor de luminosidad, si es factible realizar operaciones de riego o no, maximizando el ahorro de agua y evitando que las plantas se quemen

debido al efecto del rocío y el sol. Posee un sensor de temperatura que permite generar señales de alerta evitando realizar riegos cuando la temperatura es demasiado baja evitando las denominadas heladas que dañan las plantas.



Fig. 1. Arquitectura del sistema

El sistema de control permite al usuario definir las parámetros de siembra, riego, fumigación, recolección, entre otros. Además es el encargado de planear y ejecutar las trayectorias del robot para realizar cada una de estas tareas.

Cuenta con realimentaciones del nivel de los líquidos contenidos en los tanques de riego, fertilización y fumigación. Posee una cámara de acceso remoto que permite monitorear en todo momento el desarrollo de las tareas planeadas por el usuario.

3. DISEÑO DEL SISTEMA DE ENERGÍA SOLAR

El sistema de energía solar consta de paneles fotovoltaicos, regulador, baterías e inversor, como puede apreciarse en la figura 2.

Para el cálculo y dimensionamiento de las instalaciones fotovoltaicas existen diferentes métodos, el método a implementar en este caso es el método del peor mes o el mes más desfavorable (Markvart y Castañer, 2003), para obtener unos resultados suficientemente precisos y una metodología intuitiva. Por medio de este método se consiguió dimensionar el sistema con paneles de 12V y la respectiva carga de consumo.

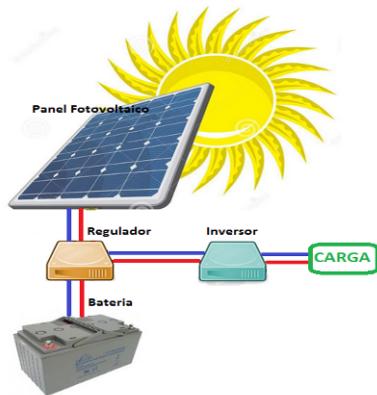


Fig. 2. Sistema fotovoltaico aislado.

3.1 Determinación de la energía eléctrica diaria

Para la determinación de la energía eléctrica diaria, se hace necesario saber qué tipo de receptores van hacer conectados a la red y si son de corriente alterna (CA) o continua (CD), para este caso solo se tienen receptores alimentados por CA (corriente alterna) como se observa en la tabla 1.

Tabla 1. Consumo alimentado por alterna.

Receptores de corriente alterna				
Tipo de receptor	Nº unidades (N)	Potencia (W)	Horas de funcionamiento diario (h.)	Energía E=N.P.Horas(W h)
Portátil	1	50	24	1200
Robot	1	18	24	432
Consumo total de CA Wh (ECA)				1632

Una vez conocidos los consumos en corriente alterna se aplica un factor de seguridad para tener en cuenta posibles pérdidas en las conexiones, aumentos imprevistos de consumo, etc. En la mayoría de instalaciones se suele adoptarse un margen de seguridad (F_s) del 15%. Y en el caso de los consumos de corriente alterna, se tendrá en cuenta la eficiencia del inversor ya que los inversores tienen pérdidas. En este caso el inversor tiene un valor de $h_{inv} = 85\%$.

Aplicando los factores de corrección para el consumo de corriente alterna se tiene:

$$E_{AC} = (1 + F_s)(E_{CA}/h_{inv}) \quad (1)$$

Reemplazando los datos:

$$E_{AC} = (1 + 0.15)(1632/0.85) = 2208 \text{ Wh/dia} \quad (2)$$

Dónde:

E_{AC} : Consumo de corriente alterna.

F_s : Margen de seguridad.

h_{inv} : Eficiencia del inversor (85%).

Estas cantidades deben calcularse para cada uno de los meses del año (habrá en total, 12 valores de consumo). Tomando un consumo mensual constante (E_{elec}), el valor medio será de 2208Wh/día durante el año. Por consiguiente se estima para cada mes el promedio de energía de la radiación solar (H_s), que incide en un metro cuadrado de una superficie situada en el lugar de la instalación de los paneles fotovoltaicos (Lamaison, 2009), ver Tabla 2.

Tabla 2. Energía de la radiación solar mensual

Promedio de insolación mensual incidente sobre una superficie horizontal	
MES	Energía de la radiación solar mensual (Kwh/m ² /día)
Enero	5.82
Febrero	6.49
Marzo	6.95
Abril	6.50
Mayo	5.70
Junio	4.82
Julio	5.08
Agosto	5.65
Septiembre	5.93
Octubre	5.83
Noviembre	5.37
Diciembre	5.51

Teniendo la energía de la radiación solar mensual se determina el peor mes, calculando el cociente entre el consumo medio total de energía diaria E_{elec} (Wh/día) y el promedio de la radiación diaria disponible H_s (Kwh/(m²/día)), el valor más alto de los cocientes de cada mes será el mes más crítico (Gorjian *et al*, 2013). Este cociente expresado en m² representa la superficie necesaria para que la energía media diaria de la radiación solar incidente sobre esta sea igual a la energía consumida por la carga en AC.

El mes más desfavorable en este caso es junio, por lo cual se procede a calcular los módulos necesarios y baterías utilizando los datos de este mes, al ser el más crítico.

3.2 Elección del tipo y número de paneles fotovoltaicos

Llegado a este punto se hace imprescindible tener realizada la elección del tipo de panel o al menos la potencia pico del panel expresada en Wp. Los módulos son unos paneles fotovoltaicos con una tensión nominal de 12V y una potencia pico (P_{mod}) de 135 W.

Calculando la energía total producida por un panel en un día, se tiene:

$$H_s P_{\text{mod}} = (Kwh/m^2 dia)(W_p) \quad (3)$$

$$H_s P_{\text{mod}} = (4820 \cdot 135) = 650.7 \text{ Wh/dia} \quad (4)$$

Dónde:

H_s : Radiación diaria disponible.

P_{mod} : Potencia en vatios pico.

Calculando el número de paneles necesarios:

$$N_{\text{modulos}} = F_{sa} \frac{E_{\text{elec}} [\text{Wh/dia}]}{H_s [KWh/m^2 dia] P_{\text{mod}} [W_p]} \quad (5)$$

$$N_{\text{modulos}} = \frac{1.1 \cdot 2208}{650} \cdot 7 = 3.74 \approx 4 \quad (6)$$

Dónde:

N_{modulos} : Número de módulos.

F_{sa} : Factor de seguridad (1.1).

E_{elec} : Consumo de energía diario.

En este caso se requieren cuatro módulos fotovoltaicos de 135W, el coeficiente F_{sa} , es un factor de seguridad para hacer frente a imprevistos y la depreciación de las prestaciones de los diferentes componentes del sistema fotovoltaico.

3.3 Dimensionamiento del sistema de acumulación

Para realizar el dimensionamiento de las baterías antes se debe fijar los siguientes parámetros:

$P_{D\text{max}}$: Profundidad máxima de descarga expresado en las baterías de plomo ácido suele estar entre 0.6 y 0.8 y en las de NI/Cd es igual a la unidad.

La energía que deberían almacenar las baterías (E_{acu}) en un número de días de autonomía predeterminado ($N_D=1$) tras añadir un factor de seguridad (F_{sa}) es:

$$E_{\text{acu}} [\text{Wh}] = \frac{F_{sa} (N_D E_{\text{elec}} [\text{Wh/dia}])}{P_{D\text{max}}} \quad (7)$$

$$E_{\text{acu}} [\text{Wh}] = \frac{1.1 \cdot 1 \cdot 1632}{1} = 1795.2 \text{ Wh} \quad (8)$$

Dónde:

E_{acu} : Energía a almacenar.

F_{sa} : Factor de seguridad

N_D : Días de autonomía.

E_{elec} : Consumo de corriente diario.

$P_{D\text{max}}$: Profundidad máxima de descarga.

Donde la capacidad necesaria es:

$$C_T [\text{Ah}] = \frac{E_{\text{acu}} [\text{Wh}]}{V_{\text{acu}} [\text{voltaje baterías}]} = \frac{1795.2}{12} = 149.6 \text{ Ah} \quad (9)$$

Dónde:

E_{acu} : Energía a almacenar.

V_{acu} : Voltaje de las baterías.

3.4 Dimensionamiento del regulador

Para dimensionar el regulador se tiene en cuenta el voltaje nominal (12V) de la instalación y la intensidad de corriente que es capaz de suministrar el campo fotovoltaico. Deben preverse los aumentos de intensidades y tensiones suministradas por el módulo, por esto se aplica un coeficiente de seguridad (F_{sr}):

$$I_{\text{reg}} = C_c (I_{SC\text{modulo}}) (N_{\text{modp}}) = 1.25 \cdot 5 \cdot 4 = 20 \text{ A} \quad (10)$$

Dónde:

C_c : Coeficiente de corrección (1.25).

$I_{SC\text{modulo}}$: Corriente en circuito cerrado.

N_{modp} : Número de módulos en paralelo.

3.5 Dimensionamiento del inversor

El dimensionado del inversor se hace para satisfacer la demanda de potencia en servicio continuo máximo de la carga, que es igual a la suma de las potencias de todas las cargas que pueden funcionar simultáneamente.

$$P_{\text{inv}} = F_{si} \sum P_{MC} = 1.25 (50 + 18) = 85 \text{ W} \quad (11)$$

Donde:

P_{MC} : Potencia máxima de las cargas.

F_{si} : Factor de seguridad del inversor (25%).

Cuando se escoge el inversor se tiene en cuenta la potencia pico, que es la capaz de suministrar los picos de potencia cuando se conecta algún tipo de receptor. Especialmente motores eléctricos, que pueden oscilar entre 5 y 8 veces la potencia nominal del motor.

Para que la instalación pueda funcionar con 1 día de autonomía, se deben instalar 4 módulos fotovoltaicos de 135 W de potencia, una batería de 150 Ah, un regulador de 20A y un inversor de 100W.

4. DESCRIPCIÓN DE ARQUITECTURA ROBÓTICA

El robot empleado para las diversas tareas agrícolas es de tipo antropomórfico de 5 grados de libertad. En la figura 3 se puede apreciar el diagrama de la estructura cinemática del mismo y los sistemas coordinados asociados a cada uno de los eslabones de acuerdo al algoritmo de Denavit y Hartenberg.

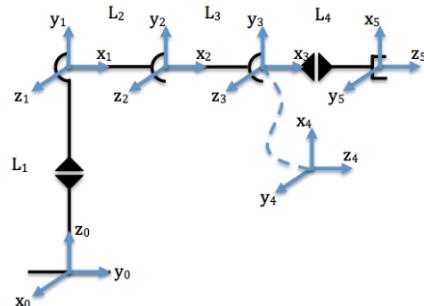


Fig. 3. Estructura Cinemática del Robot Antropomórfico de 5 GDL

Se realizaron los algoritmos de cinemática directa, inversa (Pertuz *et al*, 2014). Se creó un control cinemático para dos tipos configuraciones, la primera para realizar trayectorias punto a punto de modo isócrono de tal forma que todas las articulaciones actúen al tiempo y a la vez que minimicen el gasto energético evitando que todas giren a su máxima velocidad; la segunda es para realizar trayectorias continuas o en el espacio de la tarea.

En la figura 4 se puede apreciar una simulación tridimensional del robot realizando una trayectoria punto a punto.

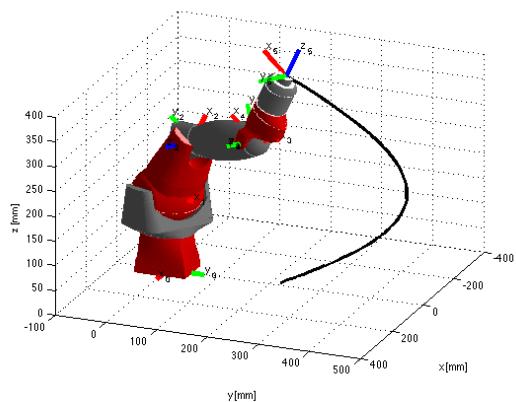


Fig. 4. Implementación del generador de trayectorias del robot

En cuanto al control dinámico, se tomó una estructura monoarticular PID (Martinez *et al*,

2011). Donde cada una de las articulaciones posee actuadores MX64 o AX12 de la empresa Dynamixel, los cuales poseen motoreductores Maxon-Motor, *encoder* y un sistema de control PID que admite referencias de posición, velocidad (López *et al*, 2013), además genera una realimentación de temperatura, par y posiciones límites con el fin de evitar sacar los actuadores de sus condiciones nominales.

En la parte mecánica, se diseñaron y simularon todas las piezas del robot en un software CAD, por medio del cual se estimaron los pesos, las inercias de los eslabones para ingresarlos en el modelo dinámico inverso del robot y corroborar que los actuadores suministraran el par requerido (Contreras *et al*, 2014). Adicionalmente se realizó el ensamblaje del brazo robótico que se ilustra en la figura 5 y se efectuó un análisis de colisiones para verificar la amplitud de cada una de las articulaciones.



Fig. 5. Brazo manipulador

Otros elementos importantes en el sistema robótico desarrollado fueron los efectores finales (Gutiérrez *et al*, 2013), los cuales se encargan realizar las tareas agrícolas de acuerdo a sus características. Las principales herramientas desarrolladas fueron: Pinza de sujeción de plantas (ver figura 6), pala, herramienta de corte para podar, rociadores, fumigadores, entre otros.

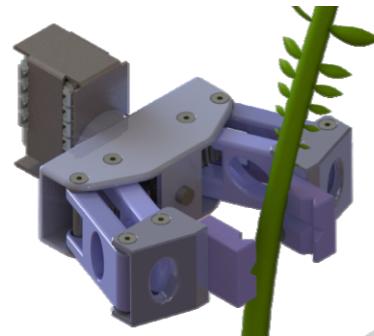


Fig. 6. Ejemplo de un efecto final implementado

Una vez se realizaron las diversas verificaciones se procedió al prototipado de las piezas por medio de una impresora 3D.

5. RESULTADOS

En la figura 7 se ilustra el dispositivo seguidor solar tipo girasol implementado, al cual se le realizaron las pruebas para verificar su correcto funcionamiento utilizando la fuente lumínica del sol.



Fig.7. Generador energía solar tipo girasol instalado.

Con el fin de contrastar la importancia del seguidor solar se realizaron experimentos bajo dos situaciones diferentes. Utilizando el prototipo sin la función de seguidor en primera instancia y posteriormente con el dispositivo seguidor activado. Se tomaron varios medidas para las diferentes horas del día según la tabla 3.

Tabla 3. Valores de potencia sin y con sistema girasol para diferentes horas del día.

Hora	P(W) con panel estático	P(W) con sistema girasol
6:00	0	3.6
7:00	6	10
8:00	20	33
9:00	45	60
10:00	80	115
11:00	129.4	145
12:00	140	150
13:00	132	151
14:00	82	118
15:00	50	63
16:00	16	27
17:00	8.6	14
18:00	0	3

Comparando los resultados de la tabla 3, se evidencia un aumento del rendimiento de la instalación con seguidor en comparación con la instalación estática. Ver figura 8.

Comparación de potencias entre sistema FV fijo y el sistema FV girasol

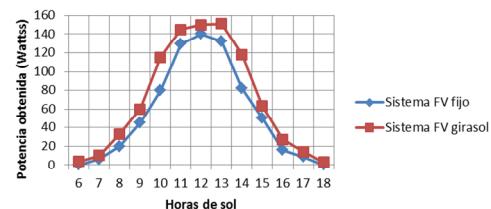


Fig.8. Comparación de potencias entre sistema FV fijo y el sistema FV girasol.

En la figura 9 se ilustra el robot construido y ensamblado, transportando una planta de sábila luego de su extracción de una maceta. Para el desarrollo de esta tarea se empleo el efecto tipo pinza ubicado en el extremo del robot. En el desarrollo de las trayectorias se evidencio el correcto funcionamiento de control cinemático y dinámico destacándose los movimientos suaves y sin vibraciones perceptibles.



Fig. 9. Sistema Robótico construido.

6. CONCLUSIONES

La combinación de los sistemas robóticos con los sistemas de generación energía solar permite el desarrollo de operaciones que contribuyen con el medio ambiente.

Para el caso de operaciones agrícolas, los sistemas de alimentación por energía solar aumentan las posibilidades aplicación debido que pueden ser implementados en lugares remotos donde no se han extendido las redes eléctricas, permitiendo sistematizar estos procesos aumentando su rentabilidad.

El desarrollo del manipulador con fines agrícolas permitió evidenciar que con solo cambiar los efectores finales, el robot es capaz de realizar diversas tareas con una calidad estandarizada, demostrando la flexibilidad que brindan estos dispositivos.

REFERENCIAS

- Contreras, P., Peña, C., Riaño, C. (2014) "0 ydulo 5 REytico para la &OMIFly de Lulos (Solanum Quitoense) Implementando 9 IMy Artificial," INGE CUC, vol. 10, no. 1, pp. 51–62.
- Gorjian, S.; Hashjin, T.T.; Ghobadian, B., (2012), "Estimation of mean monthly and hourly global solar radiation on surfaces tracking the sun: Case study: Tehran," *Second Iranian Conference in Renewable Energy and Distributed Generation (ICREDG), 2012*, vol. 2, pp.172-177.
- Gutiérrez, J., Martínez, E., Peña, C. (2013) "Development of a training module for parallel robotic and artificial vision with a universal gripper system", Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada. vol. 1, no. 21, pp. 74-80.
- Jie Jiang; Yongxue Liu; Saishuai Zhao; Minxi Zhou; Wangyu Cheng; Manchun Li, (2014), "Evaluation of wind energy resources and wind power generation based on SAR-retrieved wind in the eastern sea area of Yancheng, Jiangsu, China," *International Conference on in Geoinformatics (GeoInformatics), 2014*, vol. 22, no. 1, pp.1-6.
- Kazmierkowski, M.P.; Jasinski, M., (2011), "Power electronics for renewable sea wave energy," *12th International Conference in Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2010*, vol. 1, pp.4-9.
- Lamaison, R. M., (2009) "Energia Solar Fotovoltaica (ESF), Radiación Solar".
- Markvart, T., Castañer, L., (2003), "Practical Handbook of Photovoltaics", Fundamentals and Applications. Editores, Elsevier.
- Martínez, E., Peña, C., Contreras, D., Morgado, J., (2011) "Progress in the design of a platform for the remote control of a parallel structure through lan", Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada. vol. 2, no. 18, pp. 89-96.
- Nan Wu; Xianfeng Liu, (2011), "Geothermal energy current state and utilization in oilfield, China: An overview," *International Conference in Electrical and Control Engineering (ICECE), 2011*, vol. 1, pp.5278-5281.
- López, A., Hernández, J., Peña, C., (2013), "Avances en el control de plataformas bípedas usando el sistema kinect", Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada. vol. 2, no. 22, pp. 117-124.
- Pertuz, S.; Pena, C.; Riano, C., (2014), "RoboTender," *International Congress in Engineering Mechatronics and Automation (CIIMA), 2014 III*, vol. 3, pp.1-5.
- Ross, R.; Krijgsman, J., (2005), "New ionomer membranes for blue energy," *International Conference in Future Power Systems, 2005*, vol. 1, pp.4-18.
- Stone, C., (2011), "Renewable energy education at the Colorado School of Mines: A survey of development," *Conference in Frontiers in Education (FIE), 2011*, vol. 1, pp. S2H-1-S2H-7.
- Zghal, W.; Kantchev, G.; Kchaou, H., (2012) "Determination of the exploitable solar energy for electricity generation using the photovoltaic systems," *Conference in Renewable Energies and Vehicular Technology (REVET), 2012 First International*, vol., no., pp.43-48.