

# Implementación de un prototipo para el accionamiento de un motor de inducción usando energía solar fotovoltaica

Por Lucas L. M. Fernández y Luis R. Torres. Asesores: Guillermo L. Magaldi y Federico M. Serra  
 Contacto: Federico Serra, fserra@ieee.org  
 Laboratorio de Control Automático, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias  
 Universidad Nacional de San Luis

## Resumen

Se presenta la implementación de un sistema que permite controlar la velocidad de un motor de inducción trifásico utilizando la energía proveniente de un panel fotovoltaico. El sistema está compuesto por un convertidor CC-CC aislado que está conectado a un panel fotovoltaico y a un inversor trifásico que alimenta al motor de inducción. Se presentan resultados experimentales que validan el comportamiento del sistema propuesto.

## Palabras claves

Panel fotovoltaico, inversor trifásico, convertidor CC-CC aislado.

## 1. Introducción

Con el aumento de la demanda de energía, los problemas ambientales del mundo y el agotamiento de los recursos energéticos (carbón, petróleo, gas, entre otros) se hace necesario, en el futuro, disponer de nuevas fuentes de energía que sean renovables y limpias.

La energía solar es un tipo de energía limpia y abundante que está siendo ampliamente usada en los últimos años a partir de la utilización de paneles fotovoltaicos. El flujo de energía proveniente de un panel es controlado

por convertidores de potencia, los cuales se conectan directamente a la red o alimentan una carga arbitraria según la aplicación, como se muestra en la figura 1.

Los avances en sistemas fotovoltaicos autónomos han permitido que un dispositivo determinado pueda funcionar independientemente de la red eléctrica o en lugares donde ésta sea inaccesible. Algunas aplicaciones se remiten al bombeo de agua a partir de una bomba centrífuga impulsada por una máquina eléctrica.

El objetivo de este trabajo es la implementación de un prototipo que pueda alimentar cargas arbitrarias o independientes de la red eléctrica a partir de la generación de energía utilizando paneles fotovoltaicos.

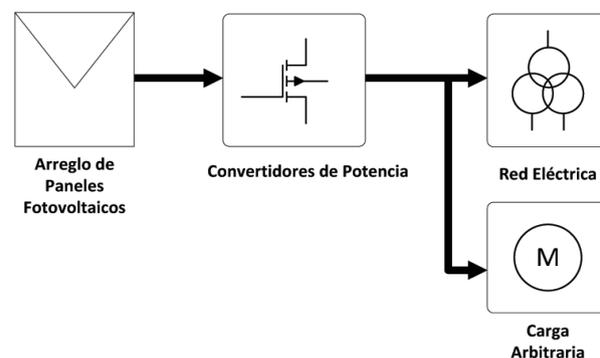


Figura 1: Diagrama general de un panel fotovoltaico conectado a la red o a una carga arbitraria.



Este artículo está organizado de la siguiente manera: la introducción presentada; la sección 2, donde se muestra el modelo del panel fotovoltaico; la sección 3, donde se presenta la topología implementada; en la sección 4 se muestran los resultados experimentales, y en la 5, las conclusiones.

## 2. Modelo del panel

En la figura 2 se muestra el modelo del panel, y en la tabla 1 se hace referencia a cada índice del modelo utilizado en la ecuación 1.

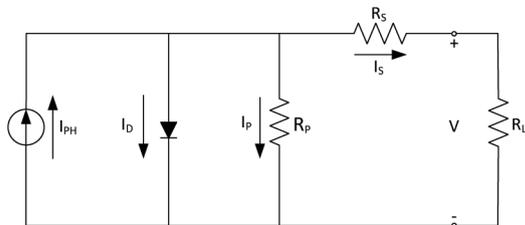


Figura 2: Modelo del panel fotovoltaico.

$$I = I_{PH} - I_0 \left( \exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{n_s \cdot V_t}\right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (1)$$

$$V_t = \frac{n \cdot K \cdot T}{q} \quad (2)$$

De las ecuaciones 1 y 2 vemos que la energía que un panel fotovoltaico puede entregar es función de la irradiancia, la temperatura y parámetros internos como resistencia serie y paralelo, entre otros.

Tabla 1. Índices del modelo del panel fotovoltaico

Símbolo	Significado
$I_{PH}$	Corriente fotogenerada
$I_0$	Corriente de saturación inversa
$V_t$	Voltaje térmico dado por (2)
$n_s$	Número de celdas conectadas en serie
$R_s$	Resistencia serie
$R_p$	Resistencia paralela
$T$	Temperatura de celda
$K$	Corriente Boltzman
$q$	Carga del electrón
$n$	Factor de idealidad del diodo

## 3. Sistema propuesto

El sistema propuesto consta de varias etapas como se muestra en la figura 3; en la figura 4 se observa una imagen del mismo.

En la primera etapa se encuentra un arreglo de paneles fotovoltaicos seguido de un convertidor CC-CC aislado, con control del seguimiento del punto de máxima transferencia de potencia (en inglés MPPT, *Maximum Power Point Tracker*). Éste está compuesto por un convertidor CC-CA y un convertidor CA-CC, ambos conectados por un transformador elevador de alta frecuencia, conformando así la etapa 2 del sistema.

La etapa 3 está constituida por otro convertidor CC-CA del tipo trifásico y un control V/Hz a lazo abierto.

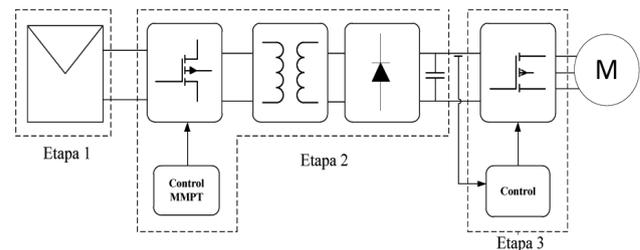


Figura 3: Sistema propuesto.

En este sistema, la tensión generada por los paneles es aplicada a un convertidor CC-CA (lado panel) que alimenta el primario del transformador, el cual acondiciona la tensión al valor requerido. La tensión del secundario



Figura 4: Imagen del sistema propuesto.

del transformador es rectificadora mediante un puente de diodos y filtrada por un banco de capacitores, generando la tensión del bus de CC, que utiliza el otro convertidor CC-CA trifásico (lado carga) para generar las tensiones necesarias a utilizar en la carga.

### 3.1 Convertidor CC-CA (lado panel)

Los convertidores CC-CA permiten obtener a la salida una tensión de corriente alterna a partir de una tensión corriente continua aplicada a la entrada. Estos se basan, fundamentalmente, en el encendido y apagado de llaves semiconductoras de potencia.

En este sistema se implementó este tipo de convertidor, en configuración puente completo monofásico, utilizando como llaves semiconductoras cuatro MOSFET IRFP250 de 30 A y 200 V.

En forma práctica, y como se muestra más adelante en la sección 4, se simula la máxima transferencia de potencia utilizando una fuente de alimentación de laboratorio y un CI TL494 para el disparo de las llaves semiconductoras. Como driver de las llaves se utilizó el circuito integrado IR2110, el cual usa la tecnología *bootstrap* para el disparo de las llaves superiores de cada pierna del puente completo.

### 3.2 Transformador, rectificador y bus CC

Como se mencionó en la sección 3, es necesario, para el sistema propuesto, elevar la tensión generada por los paneles. Para ello se realizó la construcción de un transformador de alta frecuencia seguido de un rectificador y un filtro.

El procedimiento de diseño del transformador fue realizado según Mohan *et al* 2009. Para el cálculo se necesita conocer la tensión de primario ( $V_1$ ), tensión de secundario ( $V_2$ ), corriente primario ( $I_1$ ), corriente de secundario ( $I_2$ ) y la frecuencia de conmutación de las llaves semiconductoras de potencia ( $f$ ). También es necesario conocer los valores de inducción magnética ( $B$ ) del núcleo de ferrita utilizado. En primera instancia se calcula la relación de transformación ( $n$ ) según la ecuación 3. Luego conociendo las dimensiones del núcleo, según la figura

5, se determina el área transversal del núcleo ( $A_n$ ) y el área ventana ( $A_v$ ), usando las ecuaciones 4 y 5 respectivamente. Así se puede calcular luego el número de vueltas del primario ( $N_1$ ) y el número de vueltas del secundario ( $N_2$ ) según las ecuaciones 6 y 7 respectivamente.

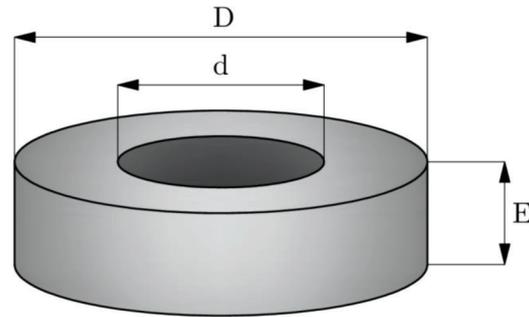


Figura 5: Dimensiones del núcleo

$$n = \frac{V_2}{V_1} \quad (3)$$

$$A_n = E \times \frac{(D-d)}{2} \quad (4)$$

$$A_v = \left(\frac{d}{2}\right)^2 \times \pi \quad (5)$$

$$N_1 = \frac{V_1}{A_n \times \omega \times B_{\max}} \quad (6)$$

$$N_2 = n \times N_1 \quad (7)$$

Seguidamente se debe calcular el área efectiva de cada conductor ( $A_{cu1}$  y  $A_{cu2}$ ) según la ecuación 8.

$$A_{cu} = \frac{k_{cu} \times A_v}{2 \times N} \quad (8)$$

$$J_{rms} = \frac{I_1}{A_{cu1}} = \frac{I_2}{A_{cu2}} \quad (9)$$

Con los datos calculados en 8, se calcula el diámetro de los conductores necesarios, según 10.



$$D = \sqrt{\frac{4 \times A_{cu}}{\pi}} \quad (10)$$

Los parámetros de diseño del transformador son presentados en la tabla 2.

Tabla 2: Parámetros de construcción del transformador de alta frecuencia.

Parámetros	Valor	Unidad
$V_1$	120	V
$V_2$	400	V
$I_1$	3	A
$I_2$	750	mA
$S_{nom}$	48	VA
$n$	4	
$f$	50.000	Hz
$A_n$	225,6	mm <sup>2</sup>
$A_v$	794,22	mm <sup>2</sup>
$B$	100	mT
$K_{cu}$	0,3	
$N_1$	70	Vueltas
$N_2$	280	Vueltas
$\omega$	$2\pi f$	rad/seg

Se adoptó un valor de 0,3 para  $K_{cu}$ , debido a que se utilizó en la construcción del transformador, un conductor tipo Litz.



Figura 6: Transformador implementado.

Para rectificar la tensión alterna a la salida del transformador se implementó un rectificador en puente utilizando los diodos F30U60N de 30 A y 600 V.

Para filtrar la tensión pulsante luego del rectificador se utilizó una combinación serie paralelo de capacitores logrando una capacidad total en el bus de CC de 330  $\mu$ F - 900 V. Esta combinación posee las correspondientes resistencias ecualizadoras.

### 3.3 Convertidor CC-CA (lado carga) y control

El convertidor CC-CA trifásico (lado carga), o también llamado "inversor trifásico", está constituido por tres piernas implementadas con transistores IGBT30N60C3D para 600 V – 63 A. La topología posee, conjuntamente, tres capacitores no inductivos de 220 nF – 600 V que suprimen los picos de tensión que se producen debido a las inductancias parásitas del montaje. El disparo de los IGBT se realiza por medio de un driver integrado IR2130.

El acondicionamiento de las señales de control está constituido por un *buffer* amplificador de corriente SNLS245 y por tres optoacopladores dobles HCPL2531.

El control se implementó utilizando el CI MC3PHAC, el cual es específico para control de motores trifásicos de CA, diseñado para cumplir los requerimientos de velocidad variable, bajo costo y fácil implementación. Este dispositivo es adaptable y configurable de acuerdo a su aplicación. Los aspectos más importantes del dispositivo son:

- » Control de velocidad V/Hz.
- » Seis salidas PWM.
- » Cuatro entradas analógicas (ADC).
- » Operación configurable para modo independiente o huésped.
- » PWM seleccionable en frecuencia y polaridad.
- » Frecuencia base seleccionable (50 o 60 Hz).
- » Interfaz de comunicación serial (SCI).
- » Tiempos muertos seleccionables.

La interfaz de usuario se diseñó de manera de facilitar la utilización del sistema propuesto y también configurar los parámetros de funcionamiento, entre ellos, la aceleración del motor.

La misma posee los controles de usuario típicos de un variador de velocidad comercial: marcha/parada, sentido de giro y velocidad. También dispone de un *reset* para el MC3PHAC y la interfaz serial del mismo para conectarse en modo huésped mediante una PC.

#### 4. Resultados experimentales

En esta sección se muestran los resultados experimentales obtenidos con el prototipo desarrollado. Se utilizó, para las mediciones, un osciloscopio digital Tektronix THS710. Como carga se conectó al inversor trifásico un motor de inducción rotor jaula de ardilla 1LA7-070-4YA10 de la empresa Siemens de 220/380 VAC - 0,25 kW.

Se emuló el arreglo de paneles fotovoltaicos, de la etapa 1, utilizando dos fuentes de alimentación de laboratorio, entregando las mismas una tensión continua de 120 V al convertidor CC-CA (lado panel). En la figura 7 se muestran las tensiones del primario y secundario del transformador. Se observa que se cumple la relación de transformación del transformador diseñado.

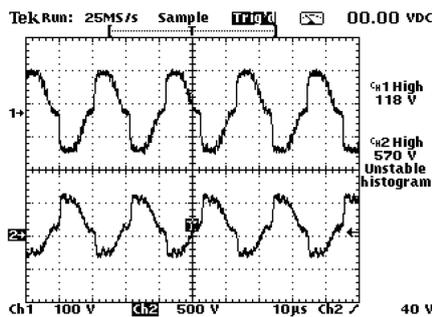


Figura 7: Tensiones en el primario (canal 1) y secundario (canal 2) del transformador.

Se fijó la frecuencia fundamental a la salida del inversor trifásico en 50 Hz. En la figura 8 y en la figura 9, se muestran la tensión de línea y la corriente de línea respectivamente, entregada por el inversor trifásico a la carga. Esta última fue determinada utilizando una sonda de corriente marca Tektronix A621. Ambas muestran valores esperados para el tipo de carga conectado.

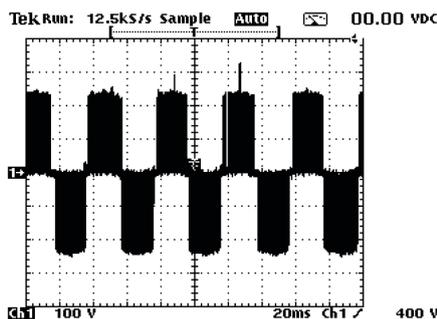


Figura 8: Tensión de línea en la carga.

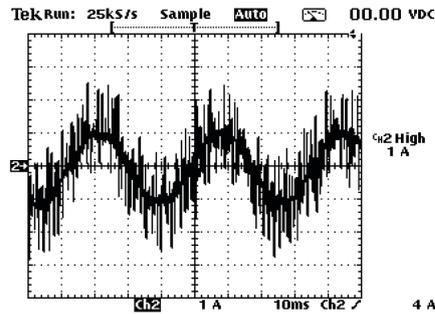


Figura 9: Corriente de línea en la carga.

#### 5. Conclusiones y trabajos futuros

En este trabajo se presentó e implementó un prototipo de laboratorio utilizado como accionamiento de un motor de inducción a partir de la energía generada por un arreglo de paneles fotovoltaicos.

Este prototipo puede ser utilizado para accionar sistemas de bombeo de agua que utilicen una máquina eléctrica de inducción de baja potencia, en lugares donde no es posible acceder a la red eléctrica.

El controlador MC3PHAC permitió el control de velocidad del motor de inducción gracias a su facilidad de implementación y bajo costo, validado con los resultados experimentales mostrados.

Como trabajo futuro se pretende trabajar en el MPPT utilizando diferentes algoritmos y modificar la configuración del filtro a la salida del convertidor CC-CC. También se pretende agregar un *chopper* de frenado al sistema implementado para evitar los aumentos de tensión provocados por cambios de giro o frenados bruscos en el motor utilizado como carga ■

*Nota del editor: Esta nota técnica es la fiel reproducción del trabajo de investigación que los autores presentaron originalmente en AADECA 2014, 24° Congreso Argentino de Control Automático. Está respaldada por una gran cantidad de bibliografía que por razones editoriales no se publican. Por consultas de esta índole, o cualquier otra acerca de la temática tratada, consultar a los autores. Federico Serra: fserra@ieeee.org.*