

## ANÁLISIS, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONTROLADOR FOTOVOLTAICO <sup>1</sup>

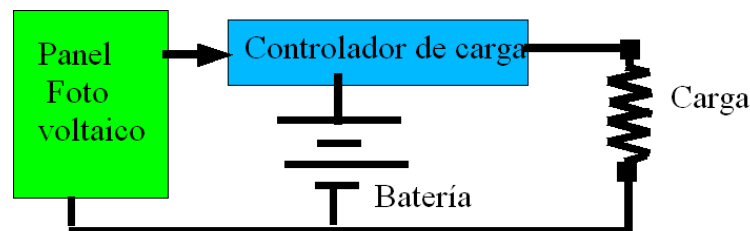
Hoyos, D; Farfán, J. y Cadena<sup>2</sup>, C  
INENCO<sup>3</sup> - CIUNSA-Universidad Nacional de Salta  
Av. Bolivia 5150 – 4400 Salta- Argentina  
Te/Fax 54 - 387 – 4255489; hoyosd@unsa.edu.ar

**RESUMEN.** El siguiente trabajo tiene por objeto el análisis de los componentes más importantes que influyen en el diseño de un controlador fotovoltaico y la construcción de un dispositivo que maximice las prestaciones del sistema, proteja y aumente la vida útil de todas las partes constitutivas, fundamentalmente las baterías. En ese sentido se armó y ensayó un controlador que mide distintas variables físicas, tales como temperatura ambiente, corriente de panel, corriente de carga, tensión de batería, procesa la información con un microcontrolador y procede al control de los circuitos de entrada y salida. El ensayo del controlador muestra el buen funcionamiento del sistema.

**Palabras clave:** fotovoltaico, controlador, microcontrolador, acumulador

### 1. INTRODUCCION

Un sistema fotovoltaico básico como el que se muestra en la figura 1 está compuesto por: panel fotovoltaico, batería, carga del sistema y el controlador de carga, el cual es el elemento encargado de regular el funcionamiento del sistema.



*Fig 1: Esquema general de un controlador fotovoltaico*

El dispositivo objeto del ensayo se supone que es un sistema aislado y se utiliza fundamentalmente para dar iluminación nocturna. El panel fotovoltaico debe entregar energía a la batería y esta debe entregarla a la carga. El controlador debe velar por el buen funcionamiento del sistema, evitando que el panel produzca la evaporación del electrolito de la batería o que la carga destruya la batería por un exceso de corriente.

Para este sistema se seleccionó un microcontrolador PIC16f877 el cual dispone de algunas características que permiten optimizar el diseño del mismo y entre ellas podemos mencionar que dispone de 8 canales análogos de medida de tensión de 10 bits, dos módulos que pueden realizar modulación por ancho de pulso y 29 canales digitales de entrada salida. Se utilizó como elemento de control de potencia el HEXFET IRFZ 44N mosfet de canal N cuyas características más importantes son: corriente máxima de 49 A, y la resistencia drenador surtidor de 17,8 miliohm.

### ANALISIS

Se ha supuesto un ciclo de carga diurna y descarga nocturna, según el diagrama aproximado de la figura 2.. De la observación de los gráficos se puede inferir que estamos en presencia de un ciclo de 24 horas, en el cual la batería se descarga durante la noche y el atardecer, para cargarse durante el día, según la radiación incidente. El ciclo de descarga no puede controlarse porque es función de las necesidades del usuario, salvo la tensión final de corte de la batería, pero la carga se puede controlar en alguna medida, lo que permite optimizar las performance del sistema .

<sup>1</sup> Parcialmente financiado por CIUNSA

<sup>2</sup> CONICET

<sup>3</sup> Instituto UNSa\_CONICET

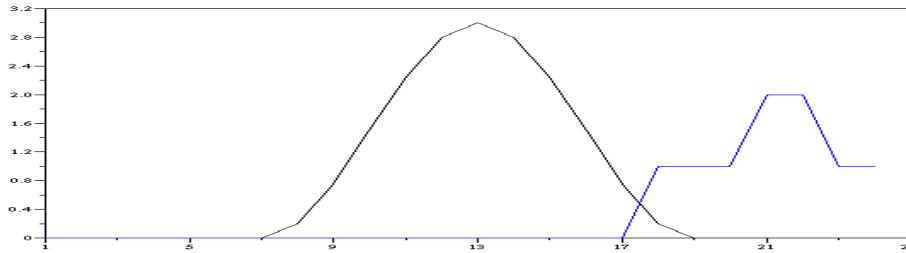


Figura 2: Curva aproximada de distribución de la corriente recibida y entregada por el sistema

### HARDWARE DEL CONTROLADOR

El controlador está compuesto por tres bloques: medición, potencia y control. El bloque de medición se encarga de medir la corriente fotovoltaica y la corriente de por la carga, la tensión de batería y la temperatura ambiente. El bloque de potencia es el encargado de suministrar corriente a la batería, modulación por ancho de pulso y como elemento de corte y desconexión un HEXFET IRFZ44N, mientras que para controlar la carga, solamente se desconecta cuando ocurre alguna de estas situaciones: la tensión de la batería sea menor que 11,3 V, la corriente sea mayor de un determinado valor, también se utiliza un HEXFET IRFZ44N. El bloque restante utiliza un microcontrolador 16f877 el cual realiza la conversión AD de los distintos parámetros.

### MEDICION

Un esquema del circuito de medición de corrientes y tensiones del controlador es el mostrado en la figura 3, en el mismo se puede observar que se mide la corriente usando la diferencia entre dos tensiones.

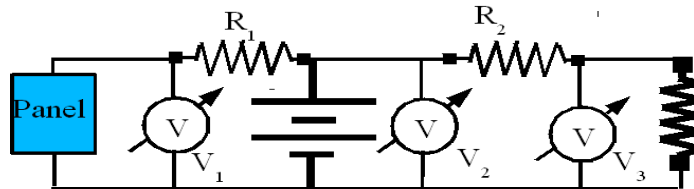


Figura 3: Esquema del circuito de medida de corriente

Para medir las corrientes fotovoltaica y de carga de la batería se utilizan dos canales analógicos del microcontrolador. El valor de las resistencias de shunt depende de la corriente máxima del controlador. Los valores de R1 y R2 son críticos ya que un valor de resistencia elevado disminuye el rendimiento del sistema y un valor muy pequeño disminuye la sensibilidad de la medida de corriente. Teniendo en cuenta que la tensión de alimentación del microcontroladores de 5V, la máxima tensión que puede medir es ésta. Por lo tanto se debe atenuar la tensión para que pueda ser medida, pero al realizar lo anteriormente dicho se disminuye la mínima corriente que se puede medir. Para no perder resolución se utiliza un amplificador diferencial, con ganancia unitaria de forma que ninguna tensión sea superior a 7V para evitar que el amplificador se sature. La ganancia de tensión del amplificador diferencial será 1 y la ganancia del amplificador no inversor será de 3,3.

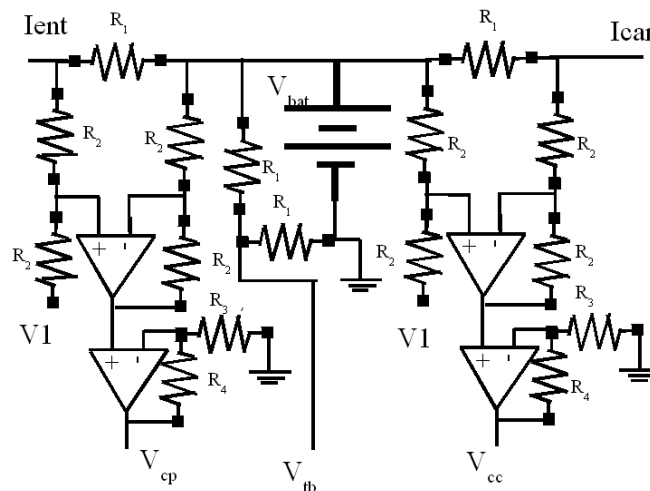


Figura 4: Circuito de medición

La expresión del número de cuentas en función de los distintos parámetros del circuito es

$$N_c = k_2(k_1 R_1 I + V_1) \cdot 2^n / V_{ref} \quad [1]$$

En donde:

- N<sub>c</sub>= numero de cuentas
- k<sub>1</sub>= ganancia del amplificador diferencial
- k<sub>2</sub>=Ganancia del amplificador inversor
- R<sub>1</sub>= resistencia de shunt
- n= numero de bits
- V<sub>ref</sub>=Tensión de referencia
- V<sub>1</sub>= Tensión para evitar la saturación de los amplificadores operacionales.

Si suponemos que k<sub>1</sub>=1, k<sub>2</sub>=3.3, R<sub>1</sub>=0.1 ohm, 2<sup>n</sup>=256 implicara que cuando circule la corriente de 3A el conversor AD tendrá como cuenta 219, debido a la fuente de tensión V<sub>1</sub>, que se coloco para evitar la saturación de los transistores, la minima corriente es 151. El circuito atenuador de la tensión de la batería es de 1/3.

## POTENCIA

El circuito de control de potencia que se muestra en la figura 5, es el de un controlador serie. En el cual se usan como elementos de control dos mosfet de potencia. El T1 se encarga de controlar la carga de la batería mientras que el T2 se utiliza solo para desconectar la carga en caso de sobre corriente o en caso de que la batería se encuentre muy descargada.

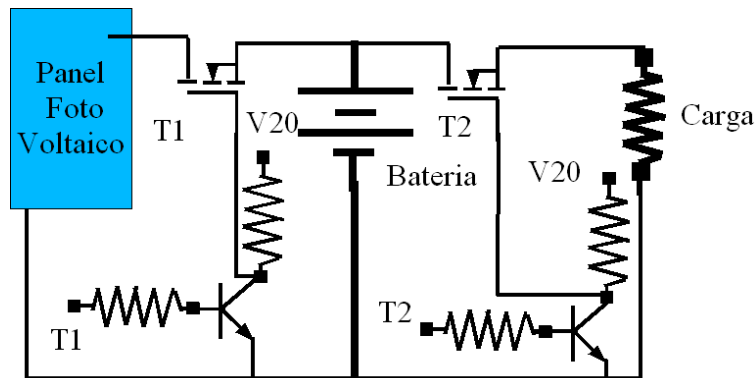
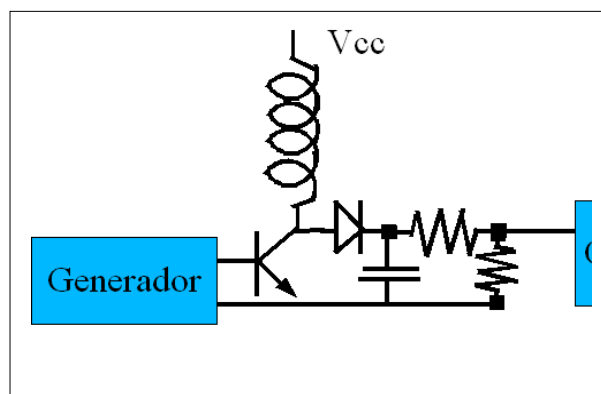


Figura 5: Circuito de control de potencia

Debido a que se utilizo un mosfet de “canal n”, la tensión drenador base debe ser (según las especificaciones del manual del orden de 7 V), lo que permite controlar hasta una corriente de 20 A. Teniendo en cuenta que el drenador de T1 se encuentra conectado a la batería y esta tiene aproximadamente 13 V la compuerta del transistor se debe conectar a una tensión de 21 V. Con este fin se construyo un circuito elevador de tensión como el que se muestra en la figura 6. En el cual una de las salidas de microcontrolador se asigna como generador y en ella se genera una forma de onda cuadrada que se interrumpe cuando la tensión alcanza los 21 V, control se encarga de realizar esta medición.

Figura 6: Circuito elevador de tensión



## CONTROL

El bloque de control está compuesto básicamente por un microcontrolador 16f877. La medición de la temperatura se realiza utilizando un circuito integrado especialmente diseñado para este fin, el LM35 que tiene una sensibilidad de 10 mV/°C.

El microcontrolador tiene por entradas las tensiones: “Vcap” encargada de medir la tensión del capacitor que polariza las compuertas de los MOSFET de potencia en el canal 0 del microcontrolador, “Vcp” es la tensión que representa la corriente

del panel canal 1, “Vcc” es la tensión que representa la corriente de la carga canal 2, “Vtb” es la tensión de la batería canal 3, La temperatura es sensada por el cana l 4. Las señales de salida serán las tensiones: T1 encargada de controlar la corriente de carga de la batería, utilizándose para esta salida el modulo 1 de modulación por ancho de pulso, T2 controla la descarga de la batería y solo se utiliza para desconectar la batería en caso de sobrecarga, cortocircuito o batería muy descargada. El sistema tiene dos leds que informan si la batería está cargada o no.

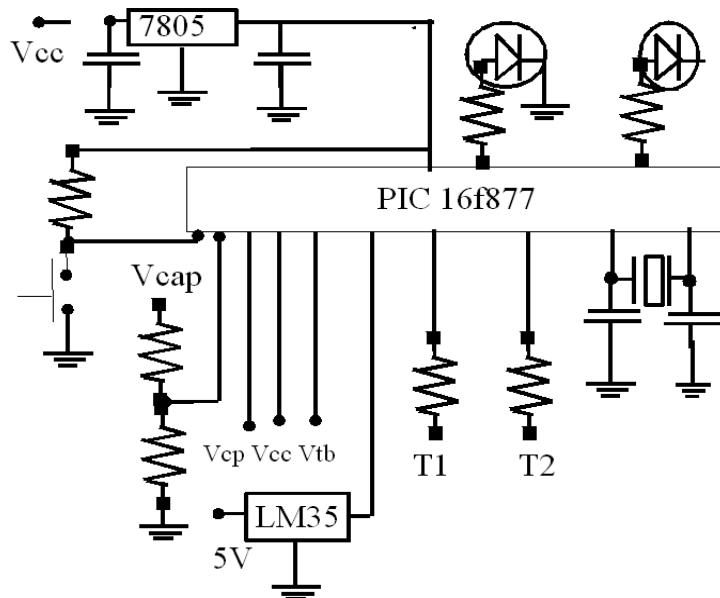


Figura 7: Circuito de Control

## BATERIAS

Las baterías utilizadas en este caso son del tipo de Pb- acido. La elección de la misma se realiza en función del parámetro capacidad en Amper-hora. La energía utilizable por el usuario no es este valor de capacidad sino un valor que se encuentra afectado de un coeficiente que para las baterías analizadas es de 0.3. Lo que significa que si se dispone de una batería de 150 Ah. La profundidad de descarga máxima que se puede realizar es de 50-60 Ah. El acumulador cuando se carga invierte energía para su propio funcionamiento lo que implica una pérdida de carga, por ello se define un coeficiente denominado eficiencia; puede ser del orden de 0.9 en los acumuladores que se están utilizando. La evaporación del electrolito es función de la temperatura ambiente y de la tensión de la batería. Una aproximación de primer orden de este fenómeno responde a la ecuación 2.

$$1.V=0,05.t+12.5 [2]$$

En donde V es la tensión a partir de la cual la batería empieza a gasear y t es la temperatura ambiente. Se debe tener en cuenta que no es conveniente para la batería una carga rápida y tampoco es conveniente para el panel tener largos periodos de tiempo, a circuito abierto, o en corto circuito (como es el caso de los controladores convencionales) por lo tanto es conveniente suministrar carga a la batería durante la mayor parte del día.

## ACCIONES DE CONTROL

El control de este sistema debe tener en cuenta:

La batería no comience a evaporar electrolito.

El ciclo de carga debe ser tal que en el transcurso de 24 horas la carga consumida por el usuario el día anterior debe ser restituida (al menos idealmente) al 100 %. Durante las horas de sol.

### Control de la solución evaporación electrolito

La temperatura se mide con un LM35 que tiene una sensibilidad de 10 mV/°C y se tiene que cumplir con e.c. [1] esto traducido a cuentas da la ecuación [3]

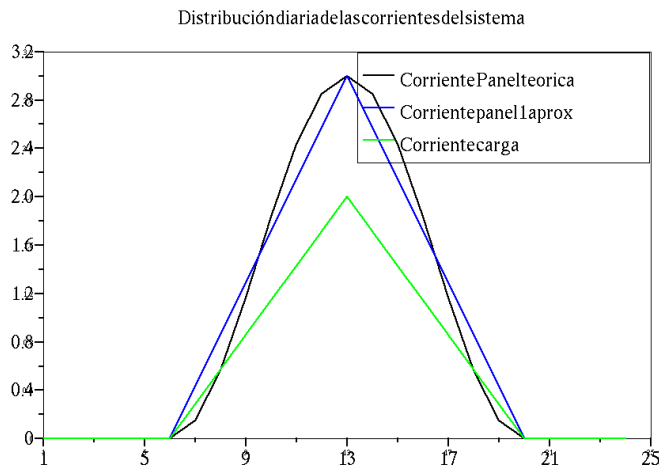
$$2.Nc=5/3+213 [3]$$

La cual nos indica la tensión a partir de la cual se debe detener la carga.

### 1.Ciclo de Carga

En este sistema se trata que el panel entregue a la batería, la carga consumida el día anterior. Como se muestra en la figura 8. En la misma se puede observar la distribución de la corriente del panel a lo largo del día, para un día típico sin nubosidad para realizar el control se supone que la cantidad de corriente que puede entregar el panel es una función triangular como se observa en la figura, esta es una aproximación de primer orden con respecto a la distribución real. El valor máximo de esta

distribución es el correspondiente a la hora de máxima radiación, el mediodía solar. Por lo tanto los Ampere-horas que puede entregar este sistema será igual a la máxima corriente que puede suministrar el panel multiplicado por la duración del día dividido 2, integral de la función triangular



**Figura 8: Distribución diaria de las corrientes del sistema**

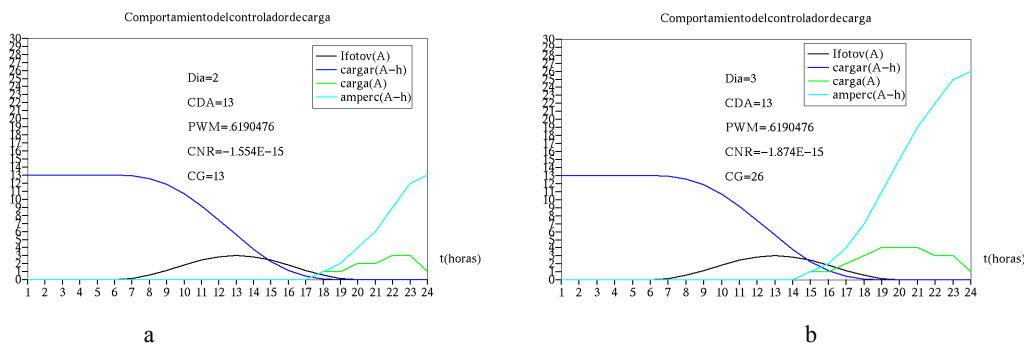
Este valor en general es mayor que el consumo de la carga de la instalación, como se muestra en la figura 8. Por lo tanto si se desea reponer la carga a lo largo del día, se debe entregar en cada intervalo de tiempo la relación entre la carga consumida en el día anterior y la carga máxima posible. Se utiliza con este fin modulación por ancho de pulso (PWM), la cantidad de corriente entregada en PWM es proporcional a la relación entre el periodo de la función y el tiempo de alto.

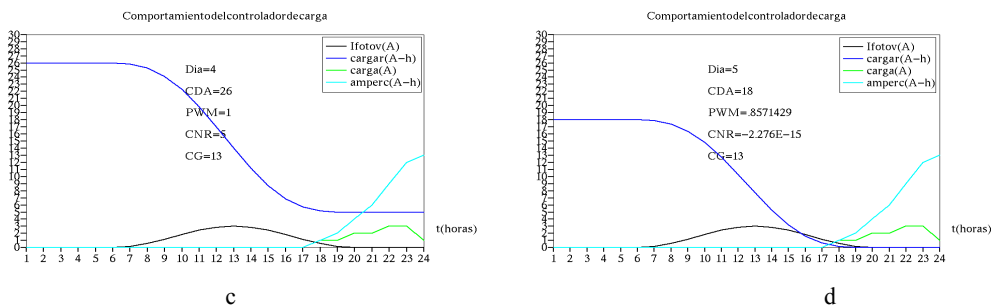
Se mide la corriente de carga de la batería y la corriente de descarga, se integran estos valores a lo largo de un ciclo de un día, con el valor máximo teórico y con la carga consumida el día anterior se determina el periodo y el tiempo de alto de la modulación por ancho de pulso.

En la figura 9 se puede observar una simulación de cuatro días de operación del controlador de carga, **CDA** significa carga consumida el día anterior por el sistema en Ampere-hora, **PWM** modulación por ancho de pulso, **CNR** carga no restituida a la batería al final del día por el sistema, **CG** energía consumida por la carga durante el día. Las funciones mostradas en la grafica son **Ifoto** es la corriente que puede suministrar el panel, **cargar** es la energía en Ampere-hora que el panel esta enviando a la batería, **Carga** es la corriente en Ampere que esta consumiendo la instalación y **amperc** es la energía consumida por la instalación a lo largo del día.

El controlador de carga mide la energía consumida por la instalación durante la tarde y la noche restituyendo este valor durante el día siguiente figura 9a, cuando la energía consumida supera la carga que puede restituir en un día figura 9b el controlador restituye la carga en los días subsiguientes 9c y 9d. Si se observa en la figura 9c el controlador aprovecha toda la energía disponible siendo la relación PWM=1 en caso que la energía requerida sea mayor que la que puede aportar, en 9-d se encuentra en régimen normal.

Este algoritmo de control es muy sencillo, solo necesita que al comenzar a operar el sistema se reinicie temprano a la mañana del primer día, cuando la radiación es casi cero y no se comenzó a consumir energía de los acumuladores. Pero tiene algunos problemas, por ejemplo si una nube disminuye notablemente la radiación solar, el sistema no puede acomodarse para reponer en el día la energía consumida. El algoritmo de control no distingue en que momento del día se encuentra el controlador. Por lo tanto se realizo una modificación, en la cual se define como noche cuando el panel fotovoltaico entrega una corriente menor a 0.1 A, durante ese tiempo PWM=1, amanecer cuando la corriente supera con pendiente positiva 0.1 A, atardecer cuando la corriente es menor a 0.1 A con pendiente negativa, duración del día la diferencia entre amanecer y atardecer, mañana la primera mitad del día. Tarde la segunda mitad del día. Se calcula la relación de modulación por ancho de pulso para la mañana y la tarde de forma que cada una debe restablecer la mitad de la carga del día.





**Figura 9: Secuencias del ciclo de carga y descarga del controlador**

**PROGRAMA DE CONTROL**

El microcontrolador PIC16F877 se programa en lenguaje de maquina, se utilizo la interrupción del contador TMR0 para implementar un reloj. TMR0 es un contador que una vez configurado esta continuamente contando. Cada vez que se desborda hace un llamado a una interrupción, esta subrutina incrementa un conjunto de contadores en cascada, fracción de milisegundos, milisegundos, minutos, 15 minutos, horas, días, por ejemplo: cuando el contador segundos llega a 60 se borra y aumenta minutos. Cuando el contador minutos se pone a uno se realiza la medición de los distintos parámetros, corriente de panel, corriente de carga, tensión de batería, temperatura y la integración de las corrientes. En la hora 0 se realiza el calculo de la relación de modulación de pulso, duración del día anterior en cantidad de periodos de 15 minutos. Cuando la corriente de panel supera los 0.1 A, y la corriente anterior es menor a ese valor, se determina el amanecer y se inicia la cuenta del día siguiente, durante este tiempo la relación de modulación es cero. Cuando la corriente de panel baja de 0.1 A o sea la corriente medida es menor de 0.1 y la anterior mayor de 0.1 A se determina el fin del día. Con estos valores se determina el mediodía, donde se recalcula la relación de modulación PWM

Por ejemplo un día de 10 horas tendrá 40 periodos de 15 minutos y la energía será proporcional a  $151 \cdot 40 / 2 = 3020$  cuentas, un día de 14 horas tendrá como máximo teórico 8456. La energía consumida por la carga también es proporcional a la cuenta obtenida de sumar todas las cuentas obtenidas al medir la corriente en la carga. Por esta razón se divide el máximo teórico de energía suministrada por el panel en cuentas por 32 que da como resultado 149, que es un número de 8 bit y se lo utiliza como periodo de PWM mientras que el tiempo de alto es la cuenta de la energía consumida por la carga dividido por 32. Este valor se reajusta al mediodía.

**CONCLUSIONES.**

El algoritmo de control de este sistema fue simulado y probado como se muestra en la figura 9. El sistema fue probado en laboratorio simulando cargas y conectando paneles fotovoltaicos. La lógica de control del controlador fue desarrollada para un panel, pero cambiando la resistencia de shunt, de modo apropiado se probó el sistema con una corriente máxima de 20 A o sea 6 paneles aproximadamente. Las resistencias de shunt son la mayor causa de disipación de energía del controlador. El rendimiento del sistema es de 0.93 con HEXFET. Se probaron distintos transistores, el 2N3055 controla hasta 2 paneles, MJ15004 controla hasta 3 paneles. Al utilizar transistores bipolares el rendimiento disminuye hasta 0.9, pero el costo del controlador disminuye sensiblemente. El sistema presenta dificultades de control en una situación tal que el instante de máxima energía disponible para el elemento fotovoltaico no es el mediodía. Esta situación se puede dar por ejemplo en una región donde las lluvias ocurren al mediodía. .

**REFERENCIAS**

- Duffie J. A. y Beckman W. A. (1991). Solar Engineering of Thermal Processes, 2ª edición. Wiley Interscience,
- Serie Ponencias Ciemat. (2000). Fundamentos, dimensionado y aplicaciones de la energía solar fotovoltaica.. Universidad Politécnica de Madrid.
- Bechtel National Inc. (1980). Handbook of battery storage for photovoltaic power systems. Sand 80. Sandia Laboratories.