

## SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE ACUMULADORES PARA USO SOLAR.

**P. Cossoli, R. Sanchez, L. Zini, A. Busso, L. Vera,**  
GER – Grupo en Energías Renovables - FaCENA – UNNE.  
Av. Libertad 5470 – 3400 Corrientes. Argentina.  
Tel/Fax: (0379) 4473931 e-mail: pcossoli@ger-unne.com.ar

**RESUMEN:** Este trabajo presenta el desarrollo de un sistema de caracterización de acumuladores para uso en sistemas fotovoltaicos autónomos. Tal sistema consta de un contenedor aislado térmicamente donde se encuentran, parcialmente sumergidas en agua, las baterías a ensayar. Un sistema de refrigeración y calefacción permite especificar una determinada temperatura del fluido que rodea las baterías, la cual, mediante técnicas de control digital, se mantiene constante durante el tiempo que dura el ensayo. La carga y descarga de las baterías está controlada mediante una fuente de alimentación bipolar (Kepco, BOP 36-12D) junto a un circuito de control que permite operar dicha fuente de manera automática. Un conjunto de sensores y dispositivos de medición permiten medir las variables de interés, tales como tensión, corriente y temperatura, para luego ser almacenadas y procesadas mediante el uso de un software para PC.

**Palabras clave:** Instrumentación, Sistemas fotovoltaicos, Baterías solares.

### INTRODUCCIÓN

La energía solar fotovoltaica (ESFV) resulta una alternativa viable para proveer de electricidad a regiones rurales alejadas de las líneas de distribución o para sistemas que prestan algún tipo de servicio en aéreas lejanas que no deba interrumpirse, así como también un camino para el desarrollo humano y productivo. Tiene la característica de ser intermitente, por ello requiere de almacenamiento para su posterior utilización cuando la demanda lo solicite.

Si bien existen diferentes formas de almacenar energía, desde el punto de vista técnico y económico se utilizan acumuladores de plomo-ácido para sistemas de baja potencia (Jossen, 2004). Estos acumuladores son de uso común en diversas áreas, quizás la más popular sea la industria automotriz. Sin embargo, los requerimientos en un automóvil son muy distintos a los demandados en sistemas fotovoltaicos autónomos (SFA) de electrificación rural. Un acumulador o banco de acumuladores para uso en SFV operan en ciclos de carga y descarga poco profundas. Sin embargo ante la falta del recurso solar, como sucede en días nublados, se realizará una descarga profunda del acumulador la que debe reponerse en los primeros días de Sol (Oliveira, 2005). Estas baterías realizan un acoplamiento eléctrico con el generador fotovoltaico a través de su tensión eléctrica, la cual se encarga de polarizar el panel fotovoltaico y determinar su punto de trabajo.

Existe un elemento, denominado controlador de carga, que se encarga de mantener los valores de tensión de la batería dentro de un rango de trabajo seguro. Los controladores de carga son utilizados en los SFA para proteger al sistema de almacenamiento contra cargas y descargas excesivas, aumentando así la vida útil de los acumuladores. En general, los reguladores comerciales trabajan tomando como base los valores de tensión instantáneos en los terminales de la batería para realizar el control del flujo de energía. Este valor de tensión en condiciones estacionarias varía en forma proporcional al estado de carga de la batería. Si la batería se encuentra en un proceso de carga o descarga, es decir en condiciones dinámicas, resultará difícil fijar un único valor de tensión que represente este estado de carga. La determinación de este valor es aun más difícil al considerar los efectos de envejecimiento, temperatura, etc.

Definir el comportamiento de un sistema de acumulación de energía es de vital importancia porque estos dispositivos son los componentes menos fiables en los SFA. Una incorrecta determinación de la capacidad real de las baterías conduce a previsiones erradas de la confiabilidad de los SFA, y una incorrecta gestión de la carga y de la descarga de las baterías conduce a una pérdida prematura de capacidad, hecho que es uno de los principales agentes de falta de energía en estas instalaciones (fallas). Estas fallas están afectando al 80% de los SFA que se instalaron en 2008 en la provincia de Corrientes como parte del Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales (PERMER) (Bello et al, 2010)

Considerando lo expuesto anteriormente el Grupo en Energías Renovables (GER) plantea la necesidad de desarrollar un sistema para ensayos de baterías que posea una inteligencia de control que contenga los conocimientos derivados del análisis del valor de la tensión y de las principales variables que afectan el estado de carga y capacidad real del sistema de acumulación. Este sistema permite realizar todos los ensayos estipulados por la norma (NBR 6581), con temperatura y corriente controlada, para determinar capacidad, durabilidad y otros parámetros significativos. El seguimiento y control de carga y descarga será realizado automáticamente a través de un sistema especializado que gerencia el proceso.

## SISTEMA DE ENSAYO DESARROLLADO

Para la realización del banco de ensayos es preciso un sistema de control de corriente y de temperatura, que adquiera los valores de los parámetros en cuestión, además de otras variables de control. Para esto, el banco de ensayos está compuesto por:

- Un sistema térmico: constituido por un depósito o contenedor aislado con un módulo de calefacción y refrigeración y un dispositivo de control de temperatura.
- Un sistema de suministro de corriente: formado por una fuente de alimentación bipolar y un dispositivo de control para dicha fuente.
- Un sistema de adquisición y medición de variables: Formado por un sistema de adquisición de datos y almacenamiento en PC y un conjunto de circuitos que permiten medir tensión, corriente y temperatura.

En la figura 1 se representa un diagrama donde se observan los principales bloques constitutivos del sistema desarrollado. La PC ejecuta un software diseñado para gestionar todo el ensayo, procesando y almacenando los valores de las variables medidas. Los parámetros de control son transferidos al microcontrolador, el cual se encarga de adquirir las señales provenientes de cada módulo de medición (corriente, tensión, temperatura) y controlar los sistemas de refrigeración así como también la fuente de alimentación.

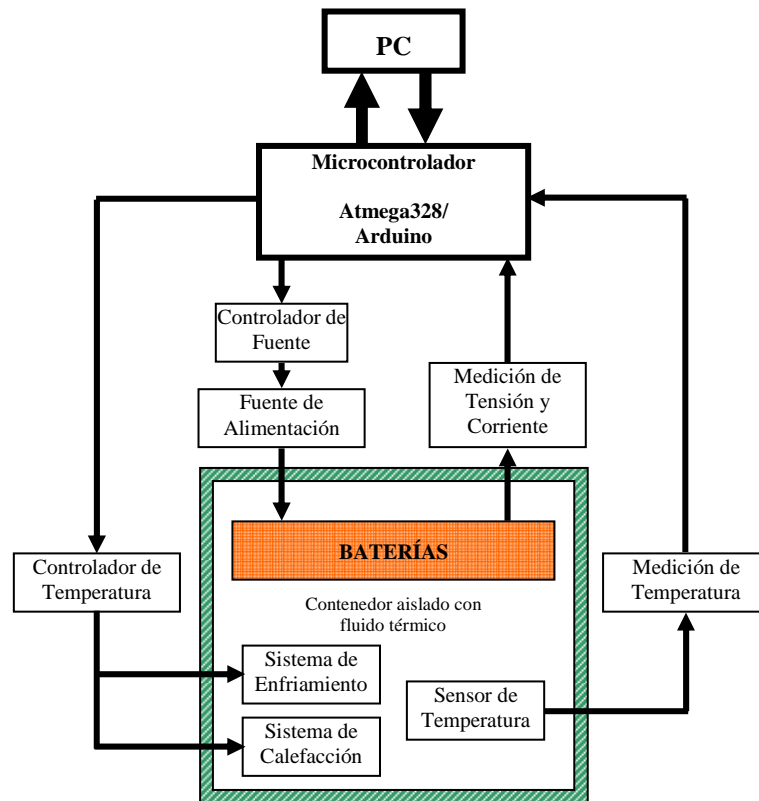


Figura 1: Diagrama en bloques del sistema de ensayos desarrollado.

### Sistema Térmico:

Con el propósito de realizar los ensayos bajo temperatura controlada, las baterías se alojan en un contenedor aislado térmicamente. Con una capacidad de 110 litros permite ensayar hasta dos baterías de uso solar de 220Ah de capacidad, con un peso de 60 Kg. aproximadamente.

Para homogeneizar la temperatura del entorno de las baterías, se las sumerge parcialmente en algún fluido, en este caso, dado el rango de temperaturas en el que se ensayan las baterías, el fluido es agua destilada. El contenedor también cuenta con un sistema de recirculación para evitar la estratificación de temperaturas en el fluido, además ayuda a reducir el tiempo en el cual se alcanza el equilibrio térmico, el cual varía de 30 a 40 minutos dependiendo de la temperatura inicial del líquido.

Para alcanzar un amplio rango de temperaturas el contenedor posee un sistema de calefacción y uno de refrigeración. Se determinó la constante térmica del contenedor, para asegurar que, una vez implementado el sistema de control de temperatura, no se produzcan conexiones simultáneas de ambos sistemas, frío y calor. La temperatura de trabajo para valores por encima de la temperatura ambiente se establece mediante dos resistencias calefactoras de 1,5 kW de potencia cada una, de igual modo, para temperaturas por debajo de la temperatura ambiente se utiliza un sistema de refrigeración por compresión. De esta manera el líquido en el contenedor sistema temperaturas en un rango de 10 °C a 60 °C.

Un conjunto de sensores de temperatura de tipo Pt100 miden la temperatura del líquido y a través de un sistema de control digital se mantiene la temperatura constante actuando sobre las resistencias calefactoras o el sistema de refrigeración según sea necesario.

*Control de temperatura:*

Para mantener constante la temperatura de la batería durante el ensayo se implemento un control digital del tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID). La figura 2 ilustra la arquitectura de un controlador de este tipo.

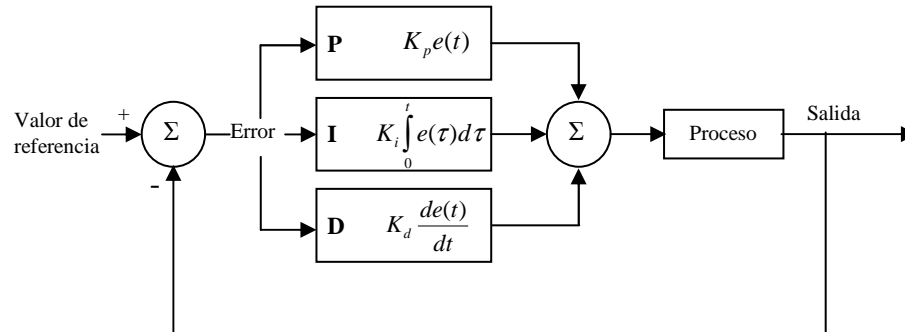


Figura 2: Diagrama en bloque donde se especifica la arquitectura de el controlador PID

El cálculo de un controlador PID involucra tres parámetros independientes, Proporcional, Integral y Derivativo. El término proporcional determina la reacción del sistema ante una señal de error, el integral determina la reacción del sistema basado en la suma de los errores reciente, y el término derivativo determina la reacción del sistema basado en la cantidad de variación del error. La suma ponderada de los tres parámetros es utilizada para ajustar la temperatura mediante el control sobre el sistema de calefacción o refrigeración. Un controlador de este tipo responde a la ecuación 1:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt} \quad (1)$$

Donde  $u(t)$  es la entrada de control del proceso,  $e(t)$  es el error de la señal,  $K_p$  es la ganancia proporcional,  $K_i$  la constante integral y  $K_d$  la constante de tiempo derivativa.

Para implementar estas ecuaciones mediante un sistema digital, como ser un microcontrolador, la ecuación (1) se convierte al dominio del tiempo discreto (dominio z), ecuación (2)

$$U(z) = K_p \left[ 1 + \frac{T}{T_i(1-z^{-1})} + T_d \frac{(1-z^{-1})}{T} \right] E(z) \quad (2)$$

Donde  $U(z)$  es la entrada de control en el tiempo discreto,  $E(z)$  es el error de la señal en tiempo discreto,  $T_i$  y  $T_d$  se denominan tiempo integral y tiempo derivativo, respectivamente.

Para encontrar los valores de las constantes del controlador se utilizan métodos de sintonización, en este caso se optó por el método de Ziegler-Nichols (Ogata, 2010). El cual consiste en evaluar la respuesta del sistema cuando en su entrada se presenta una variación en forma de escalón. Para el caso del contenedor de las baterías la entrada en forma de escalón estaría representada por el encendido del sistema de resistencias calefactoras a su máxima potencia.

En la figura 3 se muestra un diagrama de flujo representativo del algoritmo utilizado para la implementación del control PID mediante sistemas digitales.

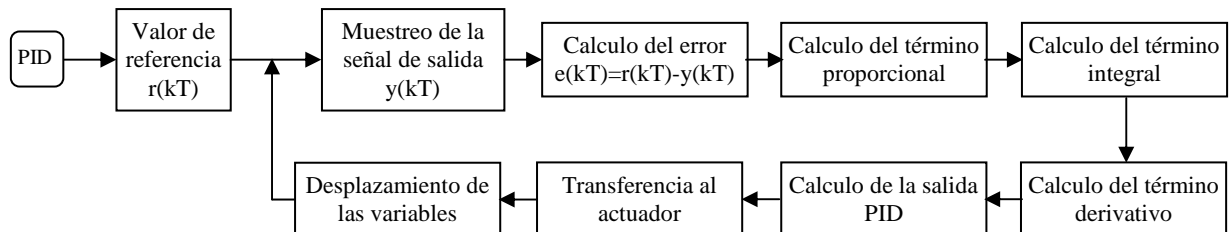


Figura 3: Diagrama en bloques que representa la forma de implementar el algoritmo PID en sistemas digitales

*Sistema de suministro de corriente:*

El suministro de energía para la carga y descarga de las baterías es ejecutado mediante una fuente de alimentación de tipo bipolar, marca Kepco, modelo BOP 36-12D, de 400 W de potencia máxima. La fuente de alimentación puede excursionar en

los cuatro cuadrantes lo que le permite funcionar como fuente o sumidero. De esta manera es posible realizar ensayos de carga y descarga sin modificar el conexionado de las baterías.

Dicha fuente opera en dos modos, Tensión Constante ( $V_{const.}$ ) o Corriente Constante ( $I_{const.}$ ). En el modo  $V_{const.}$  es capaz de entregar una tensión estable, con una señal alterna superpuesta a la señal de continua (rizado) menor a 3mV, variándose manualmente la tensión de salida entre -36V y +36V, de esta manera es posible realizar ensayos a tensión constante con arreglos de hasta dos baterías de 12V en serie. Cuando el modo  $I_{const.}$  es configurado, la fuente suministra una corriente de hasta 12A en ambos sentidos con un rizado máximo de 0.03% (Manual de usuario Kepco, 2011).

La fuente posee dos canales de control analógicos, los cuales permiten variar la tensión o la corriente de salida mediante una señal de control externa, los amplificadores internos asociados a cada poseen una ganancia fija de 3,6 y 1,2 respectivamente, con lo cual es posible excursionar todo el rango de tensiones y corrientes mencionados con una señal que varíe entre +10 V y -10 V. Estos canales de control se utilizaron para realizar los ensayos de manera automática mediante un circuito externo. También es posible establecer límites de operación, tanto en tensión como en corriente, y sirven de protección adicional para evitar sobre carga o descarga excesiva.

#### Control de la fuente de alimentación

Como se mencionó anteriormente, la fuente de alimentación posee canales de entrada analógicos para realizar de manera automática el control de la tensión o corriente de salida. Para realizarlo desde la PC, se diseñó un conjunto de circuitos cuyo diagrama en bloques se muestra en la figura 4. El componente principal de este sistema es un convertor Digital a Analógico (DAC) de 12 bits de resolución, el cual proporciona en su salida un valor de tensión continua que varía entre 0 V y 5 V, proporcional al número de cuenta digital que ha recibido en su entrada.

La transmisión del valor de cuenta digital se realiza a través de un módulo de comunicación serie (SPI – *Serial Peripheral Interface*) que tanto el DAC como el microcontrolador poseen. El valor deseado de tensión o corriente es ingresado en la interfaz de usuario que se ejecuta en la PC y transferido vía USB al microcontrolador. Este último componente realiza la conversión correspondiente para transferir finalmente el valor digital al DAC. Para controlar la fuente en todo el rango, la tensión de control debe variar entre  $\pm 10V$ , para lo cual se agrega una etapa que adapta los niveles de tensión de salida del DAC a los niveles requeridos por la fuente de alimentación.

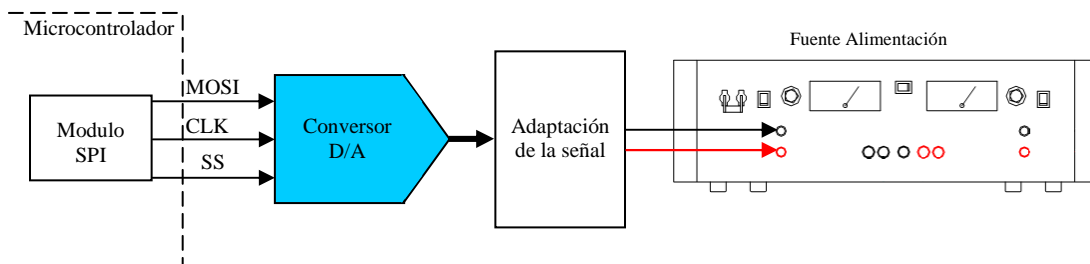


Figura 4. Diagrama en bloques del sistema de control de la fuente de alimentación.

#### Sistema de adquisición y medición de variables

El componente principal encargado de controlar todos los sensores de medición es un microcontrolador ATMEGA328, de la marca Atmel. El mismo se utiliza en conjunto con una placa de desarrollo (Arduino, 2009). Se pueden mencionar algunas características principales: 6 canales de conversión analógico-digital con una resolución de 10 bits (ADC); 6 canales para Modulación por Ancho de Pulso (PWM) con una resolución máxima de 16 bits; 13 puertos de entrada/salida digital; un módulo SPI para comunicación con dispositivos periféricos; comunicación USB para transferencia directa de datos a una PC. El microcontrolador ejecuta en su memoria de programa un algoritmo que implementa técnicas de control y rutinas de procesamiento de datos.

#### Medición de tensión

Durante el transcurso del ensayo, es de sumo interés conocer la tensión del sistema de acumulación ensayado. Para ello se diseñó el circuito de medición mostrado en la figura 5. El mismo consiste en divisores resistivos de precisión, que reducen el valor de tensión de las baterías a un nivel comprendido entre 0 y 5 V, una etapa de alta impedancia se utiliza para separar el circuito de medición del sistema a medir, luego una etapa adicional filtra y acondiciona la señal para poder ser adquirido por el ADC del microcontrolador.

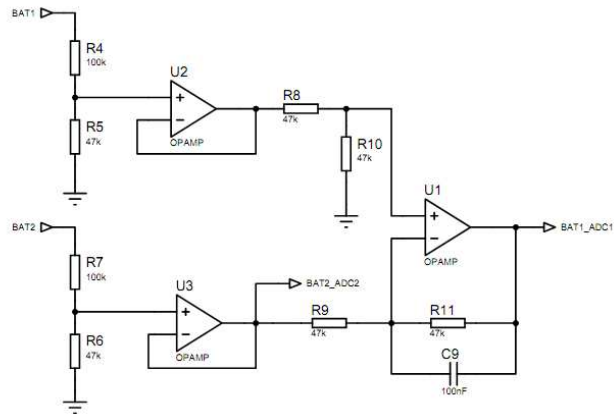


Figura 5: Circuito utilizado para medir tensión sobre las baterías. U1:3 amplificadores operacionales

### Medición de corriente

Si bien la mayoría de los ensayos se realizan a corriente constante, esto puede no ser así, por lo tanto es necesario medir la corriente de carga o descarga durante todo el ensayo.

Para la medición de la corriente inyectada a las baterías se utilizan resistencias calibradas (shunt) de 0,5% de precisión. Con una relación de 60mV/25A. La medición de corriente consiste en un circuito que amplifica la caída de tensión generada sobre el shunt ( $R_s$ ) y luego una siguiente etapa acondiciona la señal para poder ser adquirida mediante el ADC del microcontrolador (figura 6). De esta manera, el circuito diseñado se convierte en un transductor que presenta en su salida una tensión continua proporcional a la corriente que circula en la entrada.

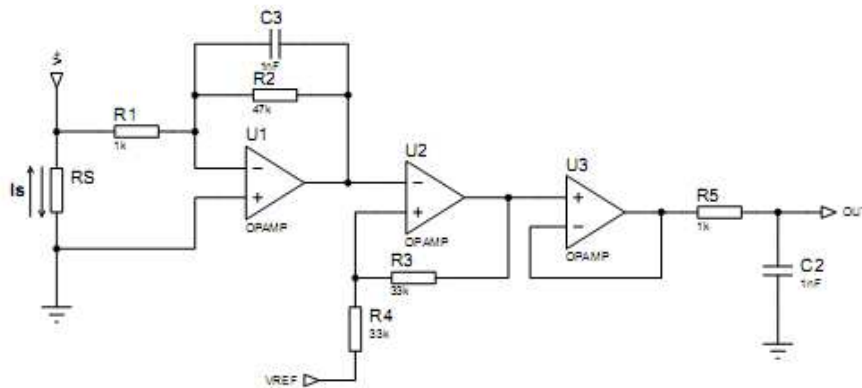


Figura 6: Medición de corriente sobre la resistencia shunt ( $R_s$ ).  $V_{ref}$ : Tensión de referencia. U1:3: amplificadores operacionales

Como los ensayos pueden ser de carga o descarga de baterías, el circuito propuesto debe ser capaz de medir corriente en ambos sentidos. Para utilizar el mismo circuito diseñado se hace una modificación, adicionando un valor de compensación (offset), en este caso de 2,5 V, de manera de tener un incremento de la tensión de salida (mayor a 2,5 V) para la corriente en un sentido y una excursión en sentido contrario (menor a 2,5 V) para corrientes en sentido contrario.

### Medición de temperaturas

En la figura 7 se presenta un diagrama en bloque con las partes constitutivas del módulo que realiza la medición de temperatura. Los circuitos diseñados tienen como componente principal sensores de tipo Pt100, los cuales fueron elegidos por su precisión y estabilidad.

Para asegurar una medición adecuada con estos sensores, por el mismo se hace circular una corriente fija de 1 mA, proporcionada por una fuente de corriente constante que se implementó con amplificadores operacionales, como se muestra en la figura 8a.

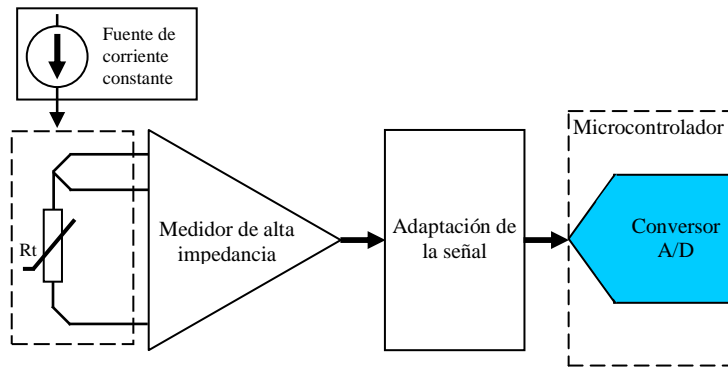


Figura 7: Diagrama en bloque del sistema de medición de temperatura

La siguiente etapa (figura 8b) conforma el circuito de medición propiamente dicho, constituido por amplificadores operacionales en configuración de seguidores, que proporcionan la alta impedancia de entrada requerida para la medición, luego una etapa diferencial para el acondicionamiento de la señal proveniente del sensor. Por último, la señal acondicionada de manera adecuada es adquirida mediante el ADC del microcontrolador.

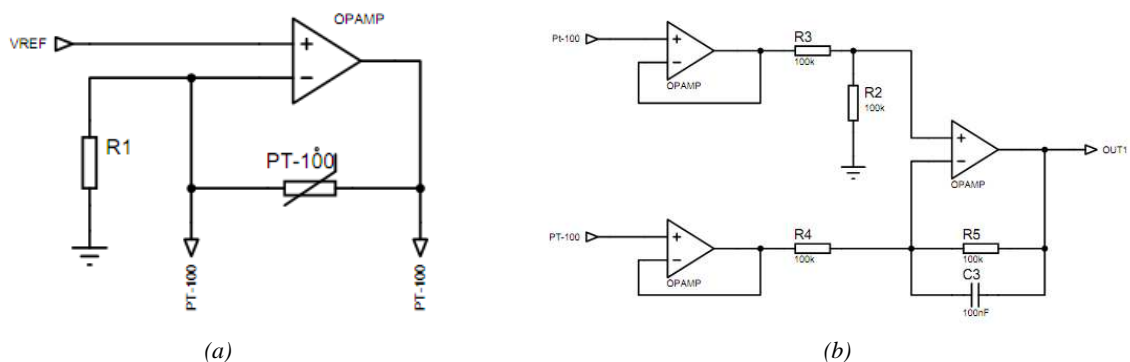


Figura 8: (a): Fuente de corriente constante con amplificadores operacionales. (b): Etapa de medición y acondicionamiento de la señal

#### Calibración de los circuitos desarrollados

Una vez implementados todos los circuitos descritos anteriormente, fue necesario realizar la calibración de cada uno de ellos, para evaluar el comportamiento en todo el rango de medición para el cual fueron diseñados.

Los sistemas de medición de tensión y corriente de baterías fueron contrastados utilizando un multímetro de 6 ½ dígitos Agilent 31410A. Para los canales de medición de tensión se utilizó la fuente de alimentación bipolar dado el bajo valor de rizado que presenta en su salida. Por otro lado, el canal de corriente fue contrastado midiendo la corriente que circula a través de un shunt de 0,5% de precisión, en ambos sentidos, y midiendo sobre el mismo la caída de tensión generada mediante un multímetro de 6 ½ dígitos.

El sistema de medición de temperatura fue calibrado utilizando una cuba termostatzada, en la cual fueron colocados los sensores Pt100. Durante la medición fue utilizado como patrón un Pt100 previamente calibrado. El sensor utilizado como patrón fue medido con un multímetro de 6 ½ dígitos.

## RESULTADOS

La figura 9a se presenta la curva de calibración en la medición de corriente con el circuito diseñado y la medición realizada con el instrumento de referencia, se observa que la respuesta del sistema diseñado posee una gran linealidad. Las curvas han sido obtenidas mediante un ajuste lineal, con un coeficiente de determinación,  $R^2$ , de 0,99. En un rango de medición que varía desde -12A hasta +12A se obtuvo un error menor al 2% respecto del valor tomado como verdadero.

Una vez realizado el contraste del sistema diseñado se procedió a realizar el ajuste para los canales de medición de tensión de baterías. Se obtuvo un  $R^2$  igual a 0,99 mediante un ajuste lineal. En las figuras 9b se presentan las curvas obtenidas en la medición de tensión con el circuito diseñado en contraste con las realizadas por el instrumento utilizado como referencia. En el rango de medición del circuito, 10V a 15V aproximadamente, el mismo posee error relativo máximo de 0,9%.

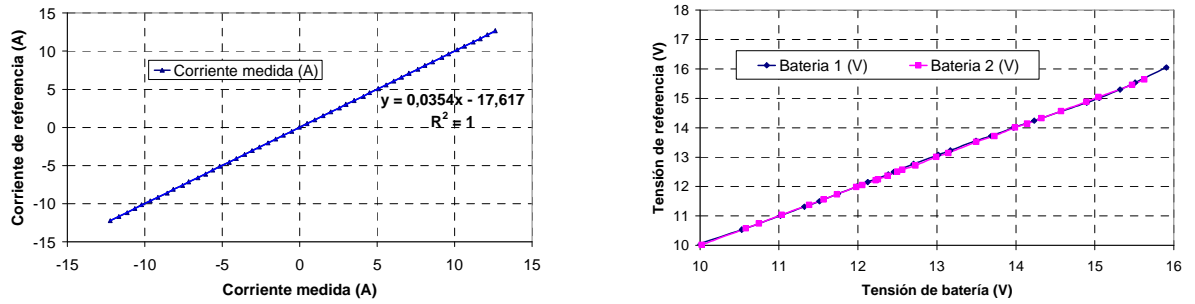


Figura 9. (a) Curva de calibración en la medición de corriente. (b) Curva de calibración en la medición de tensión de batería.

Para los circuitos de medición de temperatura se realizaron los mismos procedimientos. Con los datos obtenidos durante el proceso de contraste se realizó el cálculo de una ecuación lineal que ajuste a los datos obtenidos experimentalmente, con un coeficiente de determinación igual a 0,98. Los errores cometidos en la medición de la temperatura no superan el 2% respecto al valor tomado como verdadero.

En la figura 10 se muestra el montaje final de los diferentes circuitos desarrollados en el cual se aprecian cada uno de los sistemas o módulos descritos anteriormente.

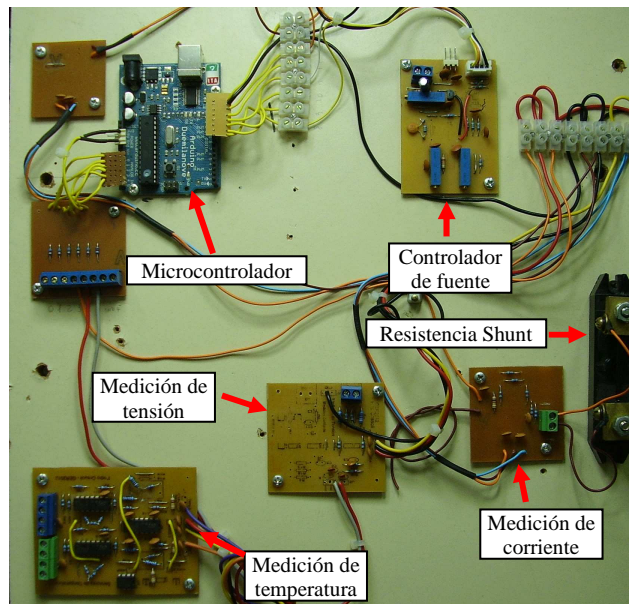


Figura 7: Montaje de los circuitos desarrollados

En la figura 8 puede observarse la grafica obtenida a partir de los datos relevados por el software que controla el ensayo. La misma corresponde a un ensayo de descarga realizado a dos baterías de 12 V y 220 Ah de capacidad, colocadas en paralelo. Puede observarse que la corriente de descarga es constante, con un valor de -10 A aproximadamente.

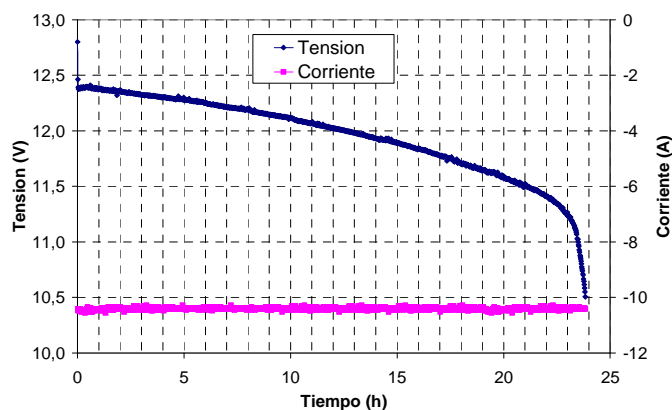


Figura 8: Curva obtenida en un ensayo de descarga a 10A de corriente constante.

## CONCLUSIONES

Se desarrolló un sistema para ensayo de baterías con un control inteligente capaz de realizar automáticamente diferentes tipos de ensayos bajo condiciones exigidas por la norma vigente (NBR 6581).

El equipo desarrollado permite también realizar el ensayo de equipos reguladores de carga y posee un software que permite programar diferentes tipos de algoritmos de gerenciamiento de energía. Por otro lado, la posibilidad de realizar el ensayo de manera automática posibilita la realización de ensayos cíclicos y acelerados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bello C., Busso A., Vera L., Cadena C. 2010, Factores Que Afectan El Funcionamiento De Instalaciones Fotovoltaicas Autonomas En Regiones Del Noreste Argentino.
- Bello C, Cáceres M, Vera L, Busso A. 2010. Equipamiento De Adquisición De Datos Para Sistemas Fotovoltaicos Autónomos Instalados En Escuelas De Corrientes. Congreso Mundial INGENIERIA, Bs. As.
- Copetti, J. B. ; Maccagnan, M. H., 2007. Baterias em sistemas solares fotovoltaicos. I CBENS - I Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza - CE.
- Carr, A.J., Wilmot, N.A., Pryor, T.L., 2004. Battery Testing at ResLab. Solar 2004: Life the Universe and Renewables, Perth, Australia.
- Jossen, A., Garche, J., Sauer, D. U., 2004. Operation conditions of batteries in PV applications. Solar Energy, 76(6), pp 759-769.
- Jun-hong Yang, Xi-yan-Bi. High-precision Temperature Control System Based on PID Algorithm. 2010. International Conference on Computer Application and System Modeling
- Norma NBR 6581 (1989): Bateria Chumbo-ácido de partida – Verificação das características elétricas e mecânicas.
- Ogata, Katsuhiko. (2010). Modern Control Engineering. 5ª edición, pp. 568-572. Prentice Hall, New Jersey.
- Oliveira, L.G.M., 2005. Estrategia de Controle de Carga d Descarga em Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Brasil.
- Operator's Manual, Kepco Inc. BOP (D) 400W, Bipolar Power Supply.
- Vera L., Krenzinger A, 2010. Perda De Capacidade De Acumulação Em Sfa: Método De Contagem De Eventos.
- Vera, Luis Horacio; KRENZINGER, A., 2009. Metodologia de Determinação da Perda de Capacidade de Sistemas de Acumulação em Sistemas Fotovoltaicos. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 13, ASADES
- Vera, Luis Horacio; KRENZINGER, A., 2007. Comportamento de baterias automotivas seladas sob diferentes condições de operação. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 11, ASADES.
- Yi Xianjun, Liu Cuimei. Development of High-precision Temperature Measurement System Bases on ARM. 2009. The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments

**ABSTRACT:** This paper presents the development of a characterization system accumulators for use in stand-alone photovoltaic systems. Such system consists of a thermally insulated container, where the tested batteries are partially submerged in water. A heating and cooling system allows to specify a certain temperature of the fluid surrounding the batteries, which, through digital control techniques, remains constant during the duration of the trial. The charging and discharging of the batteries is controlled by a bipolar power source (Kepco, BOP 36-12D) with a control circuit which allows the source to be operate automatically. A set of sensors and measuring devices allows to measure the variables of interest, such as voltage, current and temperature, which are then stored and processed by a PC software.

Keywords: Instrumentation, Photovoltaic systems, Solar batteries