

# CONTROL DIGITAL TIPO PI DE UNA FUENTE DE CORRIENTE ELÉCTRICA CON MICROCONTROLADOR

Omar Enrique Castro Hernández<sup>1</sup>, Hugo Baldomiro Cano Garzón<sup>2</sup>, Alejandro González Ospina<sup>3</sup>  
*Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Risaralda, Colombia*

ramo@utp.edu.co  
 hbcano@utp.edu.co  
 softwaresalud@hotmail.com

**Resumen**— Este trabajo presenta el diseño del sistema de control digital de la corriente eléctrica en una carga variable alimentada por una fuente de corriente directa (cd).

El control, en lazo cerrado, emplea una estructura tipo proporcional-integral (PI) que es implementada por medio de un algoritmo por software en un microcontrolador.

El sistema diseñado hace parte de uno de los proyectos del grupo de investigación ROBÓTICA APLICADA de la Universidad Tecnológica de Pereira en *el aprovechamiento y uso de la energía solar*.

**Palabras clave**— control digital, controlador PI, energía solar, fuente de corriente, microcontrolador.

**Abstract**— It is presented the design and implementation of the digital control of the electric current in a variable load fed by a source of direct current (cd).

The control, in closed loop, uses a structure PI that is implemented by means of an algorithm in software by a microcontrolador.

The designed system is part of one of the projects of the group of investigation APPLIED ROBOTICS of the Universidad Tecnológica de Pereira in the use of the solar energy

**Key Words** — Current supply, digital control, microcontroller, PI controller, solar energy.

## I. INTRODUCCIÓN

Todos los circuitos electrónicos, desde el más simple hasta el más elaborado necesitan de una o más fuentes de voltaje de cd *estables* para operar confiablemente. Estos voltajes pueden ser suministrados por baterías o por fuentes de corriente alimentadas de la red de distribución eléctrica o, mediante la conversión de otra forma de energía (como por ejemplo fuentes de voltaje que aprovechan la *energía solar* [1]).

Las fuentes *no reguladas* son inadecuadas para la mayoría de aplicaciones porque su voltaje de salida cambia con las variaciones en la corriente de carga y/o el voltaje de alimentación de la fuente. Además, introducen ruido y no cuentan con las debidas protecciones contra cortocircuitos, sobrecargas y sobrevoltajes, lo cual puede llegar a ser catastrófico [2].

Para mantener constante el valor de la corriente a la salida de una fuente se debe poseer un valor patrón (dado por una fuente de referencia), el cual no debe alterarse ante ninguna circunstancia normal de funcionamiento.

Cuando el circuito de regulación no posee ningún *muestreo* de la señal de salida de la fuente, puede darse que con diferentes regímenes de carga, la corriente de salida sufra variaciones en sus valores sin posibilidad de ser reajustada en forma automática por el regulador.

Para solucionar dichos inconvenientes, se toma una muestra de la corriente de salida de la fuente y se procesa para que mediante un sistema de regulación se modifiquen los valores de entrada trasladándose dicho ajuste a los de salida, manteniéndose constantes independientemente de las condiciones de carga. El mecanismo que relaciona los valores de salida con los de entrada en un sistema físico se denomina "realimentación" de la señal de salida [3,4].

Los controladores (reguladores) tipo PI son ampliamente usados desde hace varias décadas en el control de todo tipo de sistemas lineales dada su alta eficacia, simplicidad y su fácil aplicación [3,4]. En este trabajo se usará este tipo de controlador en implementación digital aplicado al control de la corriente eléctrica de salida de una fuente de corriente directa.

<sup>1</sup> Ingeniero Electricista.

Fecha de Recepción: 25 de Agosto de 2011  
 Fecha de Aceptación: 30 de Noviembre de 2011

<sup>2</sup> Ingeniero Electricista, Especialista en Gerencia de Tecnología.

<sup>3</sup> Ingeniero Industrial, Especialista en administración de sistemas informáticos.

## II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.

### A. La Planta o Sistema a Controlar.

El sistema físico sobre el cual se hará el control corresponde a una fuente de voltaje de cd alimentando una carga pasiva modelada con resistor (de resistencia eléctrica  $R$  [ $\Omega$ ]) y capacitor (de capacitancia eléctrica  $C$  [ $\mu F$ ]) conectados en paralelo. Los elementos básicos constituyentes del circuito eléctrico tienen valores nominales de aplicaciones industriales y son:

- Fuente de voltaje de cd con  $V_F = 48$  V.
- Carga del circuito:  $R = 10$   $\Omega$  y  $C = 0.1$   $\mu F$ .

Para diferentes regímenes de carga del circuito, el sistema de control debe ser capaz de mantener constante la corriente eléctrica entregada por la fuente de voltaje ( $I_F$ ) de acuerdo con un valor de referencia dado.

Se establece trabajar con un valor de la corriente eléctrica de referencia constante ( $I_{REF}$ ) ajustada por el usuario en un rango entre 3 [A] y 8 [A].

### B. Los Elementos del Sistema de Control.

La acción de control o señal de control la proporcionará un controlador convencional estructura PI en configuración de lazo cerrado. En la Figura 1 se muestra mediante un diagrama de bloques el sistema bajo estudio (planta+controlador) en el dominio del tiempo ( $t$ ).

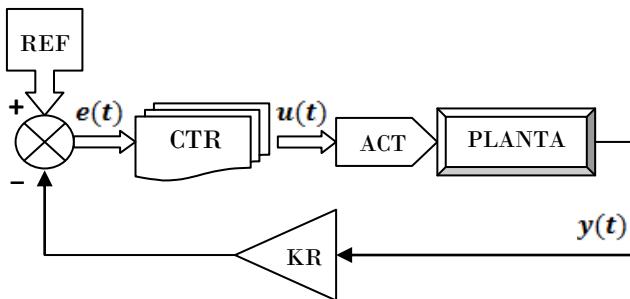


Figura 1. Esquema general del sistema bajo estudio.

donde:

**$y(t)$** : Señal de salida de la planta o variable a controlar (en este sistema, la corriente de la carga o  $I_F$ ).

**REF**: Señal patrón o de referencia o *set point* (en este caso, la corriente eléctrica de referencia o  $I_{REF}$ ).

**$e(t)$** : Señal de error o de entrada al controlador. Corresponde a la comparación entre la señal de referencia y la señal de salida de la planta:  $e(t) = REF - y(t)$ .

**$u(t)$** : Señal de control (salida del controlador). Es la señal de regulación de la salida de la planta (salida del controlador PI).

**ACT**: Actuador o elemento que permite a la planta ajustar su salida de acuerdo con la señal de control.

Para lograr el control de la corriente eléctrica proporcionada a la carga del circuito se empleará como elemento actuador un dispositivo electrónico de estado sólido configurado como interruptor o conmutador en serie con la carga del circuito. El dispositivo electrónico usado en este proyecto como conmutador es un transistor MOSFET canal P. De acuerdo con una señal de *disparo* al transistor en determinados periodos de tiempo, se controla la corriente eléctrica en la carga del circuito establecida por la corriente eléctrica de referencia [4].

El periodo de tiempo en el cual se aplica la señal de disparo al transistor lo establece el algoritmo o ley de control a través de la salida del controlador usando una señal PWM<sup>1</sup>.

Como la señal de control de la corriente de carga corresponde a una función cuadrada con ciclo de trabajo variable (señal PWM), se generará mucho ruido a la salida de la fuente puesto que una onda cuadrada está compuesta de un número infinito de señales sinusoidales, cuyas frecuencias son múltiplos de la frecuencia fundamental de la señal cuadrada. Para eliminar este ruido se utiliza un filtro pasivo de primer orden en la etapa de salida de la fuente. El filtro usado está compuesto por un diodo de recuperación rápida (D), un capacitor ( $C_F$ ) y un inductor ( $L$ ) como se muestra en la Figura 2. El filtro deja pasar solamente la componente de corriente directa y algunas componentes armónicas ya que no es muy selectivo por ser de primer orden.

Por otro lado, la frecuencia de la señal PWM debe ser alta (decenas de KHz) ya que entre mayor sea la frecuencia de conmutación, serán menores el rizado de la señal de salida y el valor de inductancia del filtro.

La medición de la corriente eléctrica en la carga ( $I_F$ ) se obtiene a través de la toma de la diferencia de potencial en un *resistor lineal* de baja resistencia ( $V_s$ ) conectado en serie con la carga (resistor *shunt* de resistencia  $r$  [ $\Omega$ ]) [6]. La corriente eléctrica medida se obtiene mediante la siguiente relación:

$$I_F = \frac{1}{r} V_s \quad (1)$$

En la Figura 2 se muestra el circuito bajo estudio junto con los elementos que componen el sistema de control. Note que la señal de salida de la planta (corriente eléctrica,  $I_F$ ) queda medida mediante una señal de voltaje ( $V_F$ ). Entonces, la corriente de referencia ( $I_{REF}$ ) debe darse como una señal de voltaje también ( $V_{REF}$ ) para obtener la señal de error respectiva:  $e(t) = V_{ERR}(t)$ .

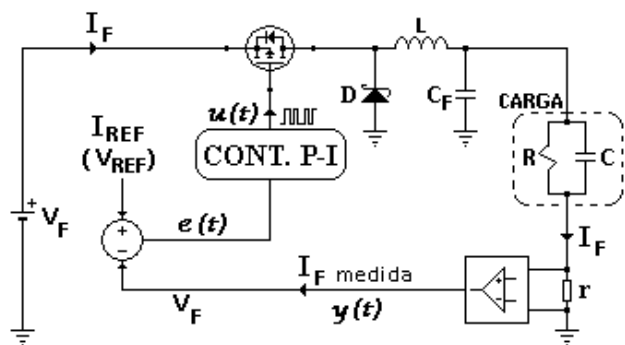


Figura 2. Elementos del sistema total.

La señal de voltaje  $V_s$  se adquiere mediante un amplificador operacional en modo diferencial y debe ser amplificada para compararla con la señal de referencia [6].

C. El Controlador PI.

La estructura del controlador PI es como se muestra en la figura 3.

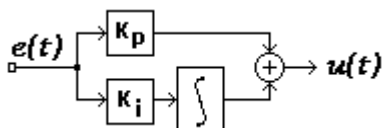


Figura 3. Estructura del controlador PI.

La salida del controlador o la señal de control  $u(t)$  de la planta se calcula a partir de la señal de entrada del controlador o señal de error  $e(t)$ , mediante ecuación 2.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2)$$

Donde  $K_p$  es la constante proporcional y  $K_i$  la constante integral del controlador. Cada una de estas constantes tiene un impacto diferente en el control, así [3,4]:

- *Término proporcional ( $K_p$ ):* Es el encargado de indicar que tan lejos se ubica la salida actual de la planta con respecto al valor deseado. Mientras más alta sea la constante proporcional, menor será el tiempo que tarde en reducir el error del sistema, pero tendrá oscilaciones sub-amortiguadas alrededor del valor deseado. En cambio, si esta constante es pequeña, puede que el sistema no tenga oscilaciones, pero nunca alcanzará al valor deseado.
- *Término integral ( $K_i$ ):* Este término almacena información sobre las actividades pasadas del sistema. Esta información es de vital importancia, ya que le brinda al sistema de control una memoria resumida sobre cómo ha ido evolucionando el error del mismo. Este término corrige el error de offset de la parte proporcional, en un tiempo que es inversamente proporcional a la constante  $K_i$ . Si esta último resulta muy grande ( $K_i > 1$ ), el sistema presentará oscilaciones antes de alcanzar el valor deseado.

III. MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA.

A. Modelamiento Matemático del Sistema.

El modelo matemático del controlador PI expresado mediante diagrama de bloques y transformado al dominio de Laplace es como se indica en la Figura 4 [3,4].

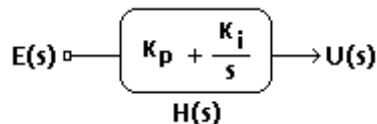


Figura 4. Modelo del controlador PI en el dominio de Laplace.

La función de transferencia  $H(s)$  del controlador es:

$$H(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (3)$$

El modelo matemático del sistema completo en el dominio de Laplace se muestra mediante el diagrama de bloques de la Figura 5.

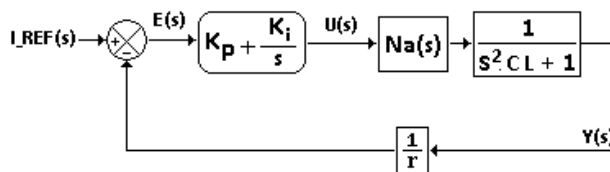


Figura 5. Diagrama de bloques del sistema bajo estudio

B. Simulación del Sistema.

Para efectos de estudiar la dinámica del circuito, sintonizar (ajustar) los parámetros del controlador PI y determinar el mejor valor del inductor del filtro, el sistema se simuló usando el software SIMULINK de MATLAB (7.0) con los parámetros de elementos dados anteriormente como se muestra en la Figura 6.

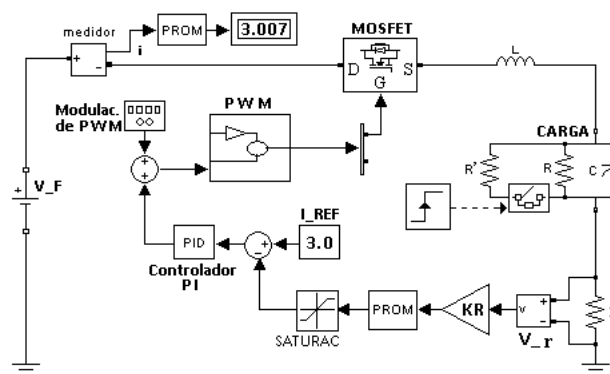


Figura 6. Elementos de la simulación del sistema estudiado.

Con la simulación se busca también determinar la frecuencia óptima de la señal PWM ya que si ésta es muy alta, resulta en mayor disipación de potencia en el transistor MOSFET.

El sistema simulado se probó para diferentes valores de referencia de la corriente de carga ( $I_{REF}$ ) dentro del rango establecido. El sistema de control efectuó la regulación adecuada en cada caso.

También se probó el sistema de control para una variación en la carga del circuito para un valor dado de  $I_{REF}$ . La variación de la carga consistió en la conexión de un resistor de resistencia  $R'$  en paralelo con la carga inicial.

Para una corriente de referencia de 3 A y con una variación de carga en el instante de tiempo  $t = 25 \text{ ms}$ , se obtuvo la respuesta del sistema que muestra la Figura 7.

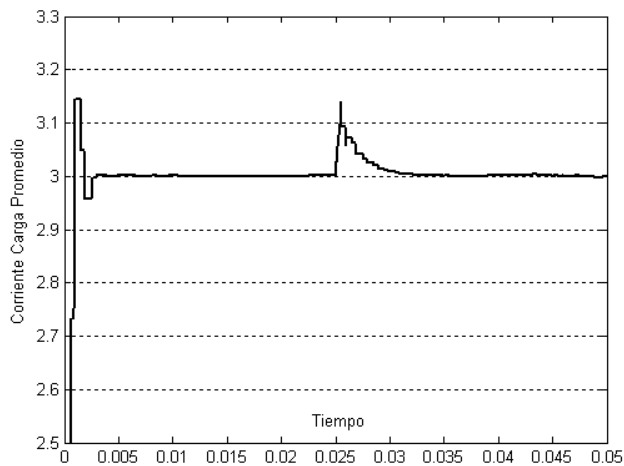


Figura 7. Respuesta del sistema de control.

Con las pruebas hechas se obtuvo la sintonización del controlador con los siguientes parámetros para la estructura PI:  $K_p = 0.5$  y  $K_i = 700$ .

De igual manera, se obtuvo la frecuencia óptima de la señal PWM como 50 KHz.

#### IV. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR PI DIGITAL CON MICROCONTROLADOR.

El sistema de control digital está basado en un microcontrolador cuyo esquema se muestra en la figura 8. El microcontrolador usado en este proyecto corresponde al PIC 16F873A de Microchip Technology, el cual dispone de convertidor A/D de 10 bits y 2 canales PWM entre otros recursos [7].

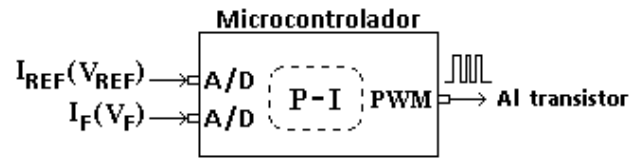


Figura 8. Implementación del controlador PI con microcontrolador. Para implementar un algoritmo de control mediante un sistema digital se requiere expresar el modelo matemático del sistema del dominio de la transformada de Laplace al dominio de la transformada Z, en el cual, las ecuaciones pueden ser descritas como ecuaciones en diferencia de coeficientes constantes [5]. Estas ecuaciones en diferencia están basadas en los valores pasados y presentes de las señales de entrada y de salida del sistema bajo estudio y también de la velocidad de muestreo del sistema de adquisición de datos.

Como las variables de entrada al sistema se miden mediante convertidores A/D y la salida del controlador PI es una señal PWM, solo el modelo matemático del controlador PI o la función de transferencia  $H(s)$  requiere ser mapeado en el dominio de la transformada Z.

Una técnica muy usada para convertir una función expresada en el dominio de Laplace al dominio de la transformada Z es mediante la siguiente sustitución [5]:

$$s = \frac{(1 - z^{-1})}{h} \quad (4)$$

Donde  $h$  es el periodo de muestreo en el proceso de adquisición de datos.

La función de transferencia del controlador en el dominio Z o  $H(z)$  se obtiene mediante la sustitución de parámetros de la ecuación 4 en la ecuación 3, así:

$$H(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = K_p + \frac{K_i}{(1 - z^{-1})h} \quad (5)$$

Organizando la ecuación 5:

$$(1 - z^{-1}) \cdot U(z) = [K_p(1 - z^{-1}) + K_i \cdot h] \cdot E(z)$$

$$U(z) - z^{-1}U(z) = K_p \cdot E(z) - K_p z^{-1}E(z) + K_i \cdot h \cdot E(z)$$

El término  $z^{-1}$  que acompaña una variable digital indica su respectivo valor de la muestra previa respecto a la muestra actual. Usando la notación con los términos  $k$  para hacer referencia a una muestra actual y  $(k-1)$  para la muestra anterior de una variable se tiene que:

$$U_k = U_{(k-1)} + (K_p + K_i \cdot h) \cdot E_k - K_p E_{(k-1)} \quad (6)$$

Con los valores de los parámetros del controlador PI obtenidos en el proceso de sintonización y para un periodo de muestreo  $h = 0.001$  s, se tiene que:

$$U_k = U_{(k-1)} + 1.2 E_k - 0.5 E_{(k-1)} \quad (7)$$

La ecuación 7 es la que finalmente se ejecuta mediante software en el microcontrolador. El algoritmo se implementa definiendo los términos de la ecuación 7 así:

- $U_k$  es la nueva salida del controlador PI y corresponde a la nueva señal de control, es decir, un nuevo ciclo de trabajo para la señal PWM que comanda los pulsos de disparo del transistor MOSFET.
- $U_{(k-1)}$  es la señal de control previa (el ciclo de trabajo anterior de la señal PWM).
- $E_k$  es la señal de entrada del controlador PI, es decir, la señal de error entre el valor de la corriente requerida o de referencia y la corriente actual.
- $E_{(k-1)}$  es el error de corriente previo al valor actual.

El algoritmo de control se desarrolló mediante lenguaje ensamblador el cual cuenta con 35 instrucciones para el tipo de microcontrolador usado. La programación del microcontrolador se hizo con el entorno de desarrollo integrado MPLAB IDE (v 8.66) de Microchip Technology para microcontroladores PIC.

En la figura 9 se muestra el circuito completo que incluye la fuente de voltaje, la carga pasiva, el transistor MOSFET con la adecuación del circuito de disparo, el microcontrolador y la etapa de adecuación de las señales medidas.

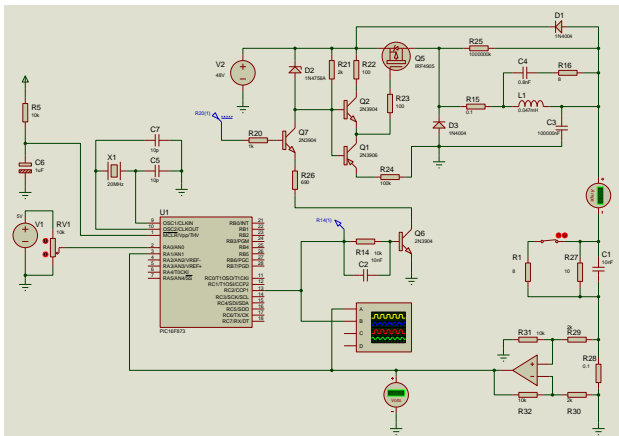


Figura 9. Esquema general del Controlador PI con Microcontrolador

Mediante el software PROTEUS (v 7.6) se obtuvo respuesta del sistema de control al implementar con el microcontrolador el algoritmo PI diseñado.

En la figura 10 se aprecia el comportamiento de la corriente de salida de la fuente de voltaje de cd cuando se varía en un instante de tiempo cualquiera la carga del circuito. La variación de carga se produce al conectar un resistor en paralelo con la carga inicial (una exigencia mayor de la corriente de la fuente). El algoritmo de control actúa regulando el valor de la corriente de carga en un tiempo de respuesta bastante corto (alrededor de 5 ms) y con un sobrepaso no superior al 10% de la señal de salida.

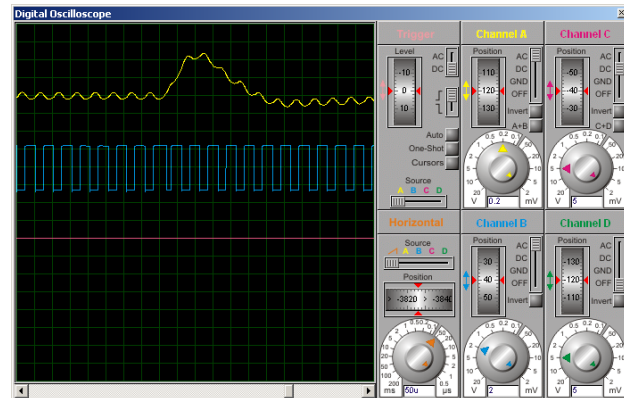


Figura 10. Corriente de carga y señal de control PWM del Microcontrolador ante una variación en la carga del circuito (disminución resistencia de carga).

En la figura 11 se obtiene la respuesta del sistema ante otra variación en la carga del circuito. Ahora, la variación de carga consiste en desconectar el resistor que se había adicionado anteriormente (una exigencia menor de la corriente de la fuente).

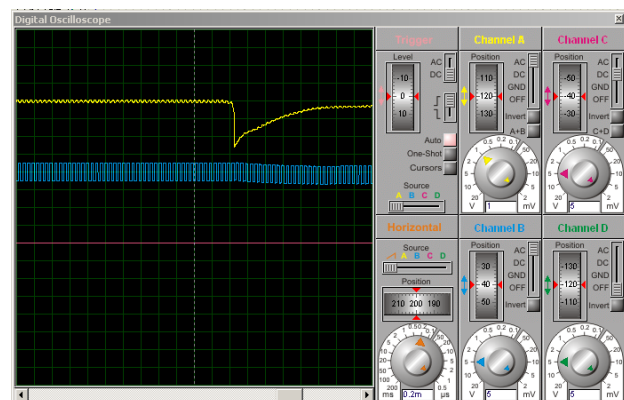


Figura 11. Corriente de carga y señal de control PWM del Microcontrolador ante una variación en la carga del circuito (aumento resistencia de carga).

## V. CONCLUSIONES.

Se diseñó un controlador digital tipo PI para el control de la corriente eléctrica de una fuente de voltaje de cd que alimenta una carga pasiva resistiva-capacitiva.

El diseño simulado mediante el software Proteus en el cual se implementó el algoritmo de control como un programa del microcontrolador PIC16F873 fue acorde con la simulación realizada en la que se obtuvieron los parámetros del controlador PI.

De las gráficas presentadas se observa que la corriente de la fuente de voltaje de cd se mantiene constante ante las variaciones de la impedancia de la carga (disminución/aumento). Esto significa que la corriente de salida se mantendrá constante aunque la impedancia de la carga varíe dentro de los límites normales de operación establecidos.

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante la adecuación y adquisición de datos de las variables a medir y la implementación del controlador PI con el software del microcontrolador, resta en este proyecto su implementación práctica, fase que se encuentra en desarrollo.

La sintetización de funciones mediante ecuaciones en diferencia es una técnica práctica en la medición y control de señales de sistemas físicos eficazmente implementadas mediante sistemas digitales de cómputo (por ejemplo los microcontroladores).

El hardware de este proyecto es versátil para implementar otras técnicas de control digital usando microcontroladores.

[7] "PIC 18F8XXA Microcontroller datasheet" [En línea], disponible en: <http://www.microchip.com/> (Consultado el 17 de Abril de 2011).

## VI. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. A. Misael, C. O. José A. y C. H. Omar. Aplicaciones con Celdas Solares. Revista Scientia et Technica, No. 41 de Mayo de 2009, páginas: 13-18. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [2] Pedro Claudio Rodríguez. Fuentes Reguladas, Lineales y de Conmutación. Cálculo y Diseño. Primera edición, 2000. Editorial Alsina (<http://www.lealsina.com.ar>).
- [3] K. Ogata. Ingeniería de Control Moderna. Prentice Hall. Tercera edición, 1998.
- [4] G. C. Spartacus, B. S. Domingo, M. A. José y R. M. Miguel. Teoría de Control: Diseño Electrónico. Ediciones UPC, 1999.
- [5] Chi-Tsong Chen. Analog and Digital Control System design. 1998.
- [6] F. L. Jaime A., Ch. O. José A. y C. H. Omar E. "Amperímetro Digital de Baja Potencia Implementado con Microcontrolador PIC16f877A". Revista Scientia et Technica, No. 42 de Agosto de 2009, páginas: 199-204. Universidad Tecnológica de Pereira.