

CONTROLADOR INTELIGENTE DE CARGA PARA MICRO Y PICO CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

G. A. Fernández¹, F. Botterón², V. H. Kurtz³

Grupo de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Electrónica (GID-IE).

Universidad Nacional de Misiones (UNaM) – Facultad de Ingeniería (FIO).

Juan Manuel de Rosas N° 325 – Oberá – Misiones – Argentina – C.P. 3360 – Tel.: 3755-422169; FAX: 3755-422170
guillermo.fernandez.fio@gmail.com; botteron@gmail.com; kurtzvh@fio.unam.edu.ar

RESUMEN: Este artículo propone un circuito que permite realizar un uso eficiente de la energía desaprovechada en el control de la generación por carga balasto, utilizado en micro y pico centrales hidroeléctricas aisladas. El circuito controla el suministro de energía eléctrica a una carga de baja prioridad de energización en la instalación, como ser un calentador de agua o una estufa, permitiendo así aprovechar parte de la energía utilizada en la carga balasto. El controlador permite el suministro de energía a la carga de baja prioridad sólo cuando el sistema de generación no se encuentra sobrecargado y cuando en dicha carga no es excedido el consumo de corriente permitido. Para el circuito propuesto se ha desarrollado un prototipo, utilizando en el mismo un microcontrolador de bajo costo a través del cual pueden programarse las condiciones de control de la carga. El prototipo ha sido ensayado en laboratorio, demostrando características de operación aceptables.

Palabras clave: Controlador de carga, aprovechamiento de energía, microcentrales hidroeléctricas, picocentrales hidroeléctricas, microcontroladores PIC.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de generación, constituidos por microcentrales hidroeléctricas aisladas, generalmente están expuestos a altas demandas pico y bajas demandas promedio, esto trae los siguientes problemas (Smith, 2003):

- Dependiendo de la magnitud de la sobrecarga, en horas pico de consumo, pueden presentarse sobrecargas reducidas o elevadas. En el primer caso, la operación de la central resultará en una generación con voltaje menor al que debería entregar. Cuando la sobrecarga es elevada, directamente puede producirse un corte del suministro de energía. En ambos casos, el usuario será insatisfecho, ya que pueden producirse pérdidas en actividades que generan ingresos.
- En horas de bajo consumo, el recurso no estará aprovechándose correctamente. Si el sistema de regulación de frecuencia que posee la central es por control de caudal, no se aprovechará todo el potencial hidráulico de la instalación. Mientras que si el sistema de regulación de tensión y frecuencia es por carga balasto, estará desperdiándose energía en la misma, como será visto mas adelante.

Los problemas mencionados resultan en un uso ineficiente de la microcentral, ocasionando una disminución en la calidad y confiabilidad del suministro de energía eléctrica.

Una de las técnicas utilizadas para la regulación de tensión y frecuencia en microcentrales hidroeléctricas, es a través del uso de una carga balasto, la cual constituye una carga resistiva (variable) conectada en paralelo con la carga del usuario. En esta técnica, el sistema de regulación trata que el generador siempre permanezca sometido al mismo estado de carga, para no variar la velocidad de rotación del mismo (Kurtz y Anocibar, 2005). Con esto, en la carga balasto es disipada energía de forma variable, compensando el consumo del usuario y manteniendo la velocidad de rotación del generador para controlar la frecuencia. Generalmente, la energía disipada en la carga balasto es desaprovechada (Smith, 2003), es por esto que el presente trabajo propone un circuito sencillo y económico, a través del cual puede utilizarse la energía excedente en la misma. El circuito es aplicado a una carga de baja prioridad. Esta carga puede ser, por ejemplo, un calentador de agua o una estufa, donde la falta de energía eléctrica en la misma no perjudica al usuario y a su funcionamiento. El circuito propuesto controlará el suministro de energía a dicha carga, a partir del estado de funcionamiento del sistema de generación y del consumo de corriente de la carga de baja prioridad. El controlador, mide la frecuencia de la tensión generada, permitiendo el suministro de energía a la carga, cuando la frecuencia de la misma se encuentra sobre un valor límite. Cuando se produce una sobrecarga en el sistema de generación, la frecuencia disminuye, y si la misma cae por debajo del límite, el controlador desconecta la carga. El circuito propuesto también mide la corriente consumida por la carga de baja prioridad, desconectándola en caso de que exceda un valor límite. Esta estrategia de control, permite que también la tensión generada se mantenga dentro de valores aceptables para los equipamientos eléctricos.

¹ Docente - Investigador, FIO - UNaM.

² Docente - Investigador, FIO - UNaM, CONICET.

³ Docente - Investigador, FIO - UNaM.

En el controlador propuesto, los límites de frecuencia y corriente pueden ajustarse a los efectos de otorgar una selectividad en frecuencia, con distintas cargas a controlar. Es decir, podrán controlarse diferentes cargas de baja prioridad, cada una de ellas conectada a un controlador inteligente ajustado con un límite de frecuencia diferente.

Cabe aclarar que el uso del controlador no implica la eliminación de la carga balasto, sino que en vez de desperdiciarse toda la energía excedente en la misma parte de ella puede aprovecharse, por ejemplo, para calentar agua o calefaccionar un ambiente.

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL CIRCUITO

El circuito posee como componente principal un microcontrolador de ocho bits (PIC16F818), el cual contiene un programa que mide periódicamente la frecuencia de la tensión generada y la corriente consumida por la carga a controlar. Cuando el generador (aislado de la red) impulsado por la microturbina hidráulica sufre una sobrecarga, habrá una disminución en la frecuencia de la tensión generada. A partir de esto, el circuito detecta si dicha disminución está por debajo de cierto límite prefijado. En caso de que esto ocurra, el interruptor indicado en la figura 1, corta el suministro de energía a la carga. De esta forma, el controlador de carga facilita al sistema de generación, salir del estado de sobrecarga y por ende normalizar el valor de la frecuencia de la tensión generada.

Como se ha mencionado, el microcontrolador también mide periódicamente la corriente consumida por la carga. De esta forma, el circuito interrumpe el suministro de energía a la carga, cuando esta supera el límite de corriente preestablecido. Con esto puede impedirse la conexión de cargas, con consumos no deseados, al sistema de generación.

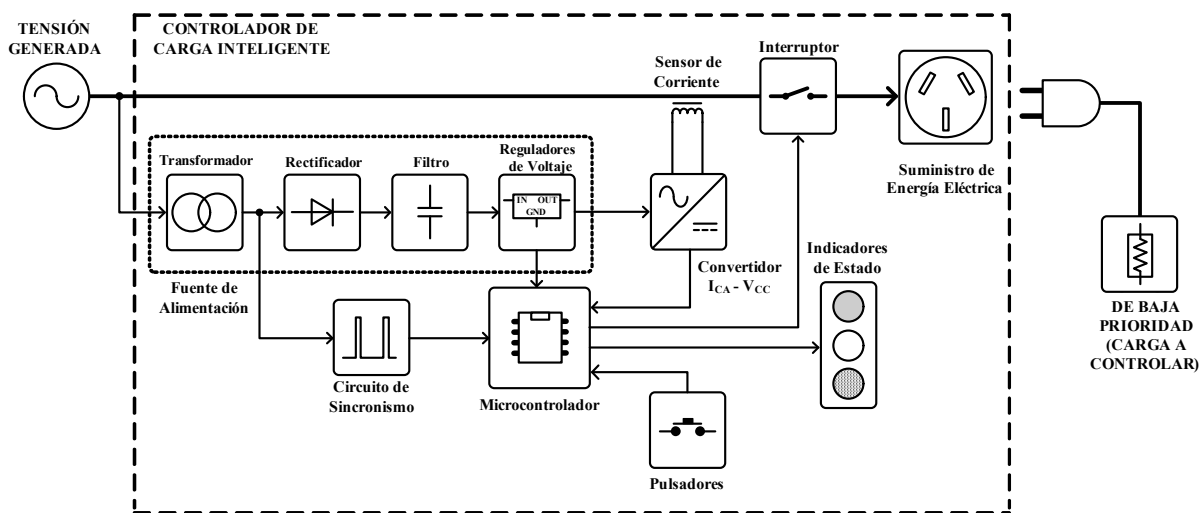


Figura 1: Diagrama en bloques del controlador inteligente de carga.

Para efectuar la medición de frecuencia, el controlador de carga utiliza uno de los módulos temporizadores del microcontrolador y el circuito de sincronismo indicado en la figura 1. El circuito de sincronismo produce un pulso cada vez que comienza un periodo de la tensión generada. De esta forma, el microcontrolador recibe un tren de pulsos cuya frecuencia es igual a la frecuencia de la tensión generada. En el microcontrolador, la medición de frecuencia es obtenida a partir del periodo correspondiente al mencionado tren de pulsos. Para esto, cada vez que el programa del microcontrolador detecta un pulso es iniciado un temporizado, pero previamente es capturado el valor correspondiente al temporizado del periodo anterior. Con esto puede establecerse el tiempo transcurrido entre pulsos, obteniéndose así el valor correspondiente al periodo del tren de pulsos. El tiempo será inversamente proporcional a la frecuencia de la tensión generada.

El periodo obtenido en esta medición, es comparado permanentemente con un valor correspondiente a un límite de frecuencia, de tal forma que el suministro de energía a la carga será interrumpido en caso de que la frecuencia de la tensión generada se encuentre por debajo de dicho límite. Es decir, la carga será desconectada cuando el sistema de generación se encuentra sobrecargado y ha bajado la frecuencia de la tensión generada.

Además de medir la frecuencia, el circuito controlador efectúa la medición periódica de la corriente consumida por la carga controlada. Esto es a los fines de interrumpir el suministro de energía eléctrica en dicha carga, cuando en la misma se produce un exceso en el consumo de corriente. Para realizar la medición, el microcontrolador utiliza un módulo interno que convierte una tensión de corriente continua en un número binario proporcional, a este módulo se lo denomina conversor analógico-digital (conversor A/D). El conversor A/D, recibe una tensión proporcional a la corriente consumida por la carga, la cual es generada por el circuito convertidor $I_{CA} - V_{CC}$ de la figura 1. Este convertidor, utiliza un transformador de intensidad para sensar la corriente derivada a la carga a controlar. El valor obtenido en la medición de corriente es comparado periódicamente con un límite preestablecido. Con esto, el programa del microcontrolador puede interrumpir el suministro de energía entregado a la carga, cuando se ha excedido dicho límite de corriente.

Para que el controlador pueda adaptarse a distintas cargas y condiciones de generación, el programa del microcontrolador permite seleccionar los límites de frecuencia y de corriente mencionados. El límite de frecuencia puede ajustarse a 47Hz, 48Hz ó 49Hz; mientras que el límite de corriente puede tomar un valor hasta 5A.

A los efectos de obtener un periodo con mayor exactitud, en esta aplicación, el divisor de frecuencia del TIMER1 es programado con una división por uno (PRE = 1). Entonces, el contador ascendente de la figura 3, recibe los pulsos con la misma frecuencia que la señal de reloj del oscilador.

Considerando que para el circuito propuesto, el microcontrolador funciona con un cristal externo de frecuencia $F_{XTAL} = 4\text{MHz}$, la ecuación 1 permite obtener el valor de la frecuencia de la tensión generada (F_G) en función del número N, que es proporcional al periodo de dicha tensión (T_G).

$$T_G = N \cdot \frac{1}{F} = N \cdot \frac{PRE}{F_{OSC}} = N \cdot \frac{4 \cdot PRE}{F_{XTAL}} \Rightarrow F_G = \frac{F_{XTAL}}{4 \cdot PRE \cdot N} = \frac{4\text{MHz}}{4 \cdot 1 \cdot N} = \frac{1\text{MHz}}{N} \quad (1)$$

A través de la ecuación 1 pueden obtenerse los valores, correspondientes a los distintos límites de frecuencia con que puede configurarse el controlador inteligente de carga. Estos valores figuran en la tabla 1.

F_G (Hz)	N_{LF}
46	21739
47	21276
48	20833

Tabla 1: Valores de N_{LF} , correspondientes a los distintos límites de frecuencia.

Entonces, por ejemplo, si el límite de frecuencia es ajustado a 47Hz, cuando en el temporizador TIMER1 se obtiene $N > N_{LF} = 21276$, el programa del microcontrolador desconecta la carga, debido a que $F_G < 47\text{Hz}$. Cabe aclarar que en la tabla 1, sólo está indicada la parte entera del resultado obtenido mediante la expresión 1. Esto es debido a que el conteo de pulsos en el temporizador, sólo corresponde a números enteros.

MEDICIÓN DE CORRIENTE

Como se ha mencionado, la corriente suministrada a la carga es medida periódicamente, esto es los efectos de limitar el consumo de la misma, ya que el circuito propuesto permite utilizar diferentes tipos cargas, pero con un consumo de corriente que no debe superar el límite para el cual será ajustado el controlador. Para la medición de corriente es utilizado un circuito que convierte la intensidad de corriente alterna (I_{CA}), suministrada a la carga, en una tensión de corriente continua (V_S) proporcional que es inyectada al microcontrolador. El programa que posee este último, obtiene el valor de la tensión V_S utilizando el módulo convertidor analógico-digital interno. La figura 4 indica el circuito que convierte I_{CA} en V_{CC} .

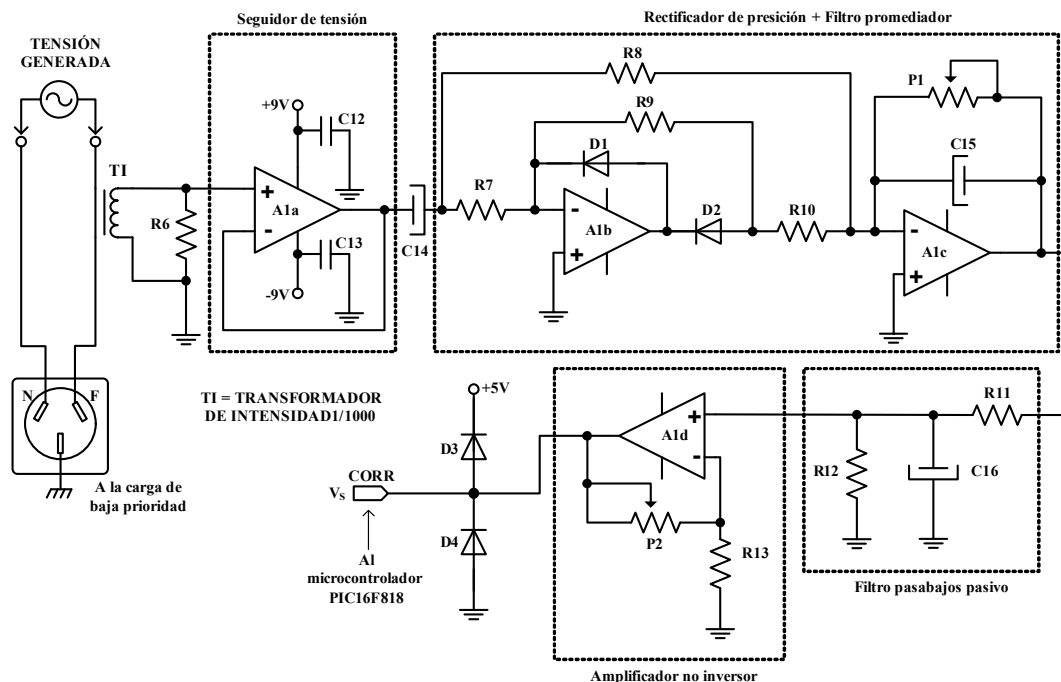


Figura 4: Sensado de corriente y circuito convertidor $I_{CA} - V_{CC}$.

Como puede apreciarse en la figura 4, la corriente consumida por la carga es sensada a través de un transformador de intensidad, que en este caso posee una relación 1/1000, es decir transforma 1A en 1mA de corriente alterna.

En la figura 4, la resistencia R6 convierte la corriente de salida del transformador de intensidad en un voltaje de corriente alterna. La tensión obtenida en R6, pasa a través del seguidor de tensión, quien impide que el resto del circuito produzca efecto de carga sobre el circuito de sensado de corriente. El capacitor C14 elimina cualquier componente de tensión de corriente continua que pueda proporcionar el amplificador A1a. Luego, la tensión de alterna es inyectada al circuito conformado por A1b y A1c, los cuales constituyen un rectificador de onda completa y un filtro promediador (Torres Portero,

1992). Con esto, la tensión de corriente alterna, obtenida luego de C14, es transformada en una tensión de corriente continua. La tensión obtenida a la salida de A1c, pasa por un el filtro pasabajos pasivo a los efectos de eliminar cualquier ruido de alta frecuencia. Por último, en la etapa de salida del circuito indicado en la figura 4, hay un amplificador no inversor que permite ajustar la amplitud de la tensión de salida V_S entregada a la entrada analógica del microcontrolador. Las resistencias P1 y P2, permiten ajustar la relación salida-entrada del circuito convertidor I_{CA} - V_{CC} a los efectos de obtener lo indicado en la expresión 2.

$$V_S = 1 \frac{V}{A} \cdot I_{CA} \quad I_{CA} = \text{Corriente eficaz consumida por la carga} \quad (2)$$

En la expresión 2, la corriente I_{CA} podrá variar según $0A \leq I_{CA} \leq 5A$, por lo cual en la salida del circuito existirá una variación $0V \leq V_S \leq 5V$.

El microcontrolador utilizado posee un módulo conversor analógico-digital de 10 bits que puede convertir una tensión de corriente continua en un valor binario proporcional. De esta forma, el controlador de carga convierte la tensión V_S en un número binario N_{AD} , que a partir de la expresión 2, será proporcional a la corriente I_{CA} absorbida por la carga a controlar. El funcionamiento del conversor A/D es gestionado por el programa del microcontrolador.

A partir de la expresión 2 puede obtenerse la relación entre el número binario N_{AD} y la corriente consumida por la carga. Esta relación está indicada en la expresión 3.

$$N_{AD} = \frac{2^n - 1}{5V} \cdot V_S = \frac{2^n - 1}{5V} \cdot 1 \frac{V}{A} \cdot I_{CA} \Rightarrow N_{AD} = \frac{2^n - 1}{5A} \cdot I_{CA} \quad n = 10 \text{ (nº de bits del conversor A/D)} \quad (3)$$

Con la expresión 3, puede calcularse el valor N_{LC} correspondiente al límite de corriente de la carga a controlar. En la tabla 2 pueden apreciarse distintos valores del límite mencionado, donde se han tomado diferentes corrientes como ejemplo.

I_{CA} (A)	N_{LC}
1	204
2	409
3	613
4	818
5	1023

Tabla 2: Valores correspondientes al límite de corriente para la carga a controlar, considerando diferentes corrientes como ejemplo.

Teniendo en cuenta la tabla 2, por ejemplo, si el controlador de carga es ajustado para un límite de corriente de 3A, entonces cuando el programa del microcontrolador detecta que el resultado de la conversión A/D supera $N_{LC} = 613$, la carga controlada es desconectada debido a que $I_{CA} > 3A$. Cabe mencionar que en la tabla 2, es despreciada la parte decimal ya que el resultado del conversor A/D es un número binario entero.

OPERACIÓN DEL CONTROLADOR DE CARGA

El controlador de carga puede operar de dos formas: modo configuración y modo normal. El primer modo permite realizar la configuración de los límites de frecuencia (N_{LF}) y corriente (N_{LC}). En el modo normal, el controlador funciona como ya se ha mencionado, midiendo frecuencia y corriente para efectuar el control en el suministro de energía eléctrica a la carga. El controlador posee una interfase de usuario que permite interactuar con el mismo en los modos de operación mencionados., Como es indicado en la figura 5, la interfase está constituida por tres indicadores de estado (leds ON, BAJA FREC. y ALTA CORR.), dos pulsadores (PROG y ENTER) y un indicador audible (buzzer). A continuación será explicado el funcionamiento del circuito propuesto, en cada uno de los modos de operación indicado.

Modo Configuración: En este modo de operación pueden configurarse los límites de frecuencia y de corriente. Para ingresar al modo, debe energizarse el controlador manteniéndose presionado durante más de dos segundos el pulsador PROG de la figura 5. Con esto se encenderá el led verde ON y a la vez sonará brevemente el buzzer. Entonces, el controlador estará listo para configurar el límite de frecuencia deseado. Existen tres posibilidades para dicho límite, 48Hz (led verde), 47Hz (led amarillo) y 46Hz (led rojo). Los límites podrán ir intercambiándose a medida que es pulsado PROG, correspondiendo a cada led encendido, una de las frecuencias mencionadas. Para seleccionar la frecuencia deseada, debe pulsarse ENTER. Con esto, el programa almacena el número N_{LF} (correspondiente al límite de frecuencia) en la memoria de datos no volátil del microcontrolador (EEPROM), y además suena brevemente el buzzer para indicar que se ha realizado la configuración del límite de frecuencia correspondiente. Luego de esta configuración, los tres leds quedan encendidos de forma permanente, indicando que puede configurarse el límite de corriente. Para efectuar esta configuración, primeramente la carga deseada debe conectarse al controlador para que el programa del microcontrolador pueda efectuar la medición de la corriente consumida por la misma. Medición que será considera como el límite de corriente N_{LC} . Cuando es pulsado ENTER, el límite N_{LC} es almacenado en la memoria EEPROM del microcontrolador y a la vez suena brevemente el buzzer, pasando el controlador de carga a su modo normal de operación.

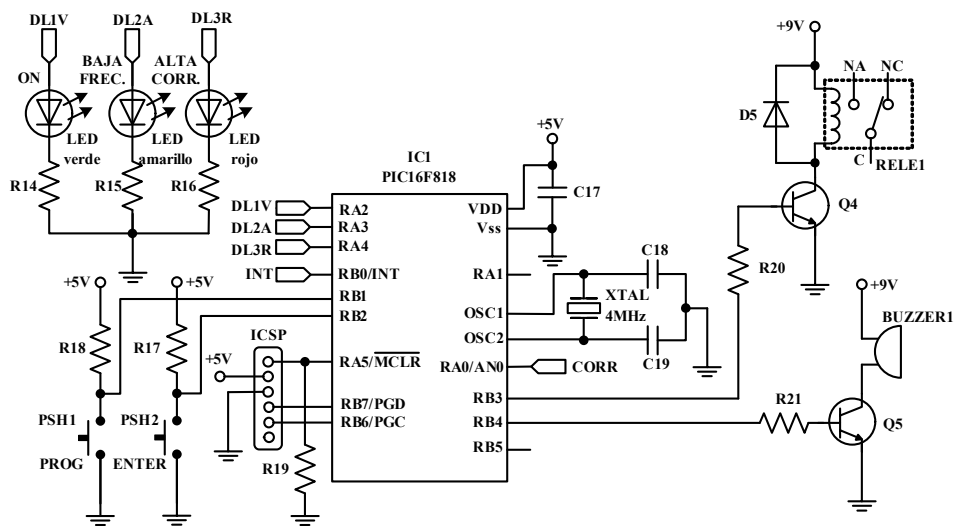


Figura 5: Microcontrolador e interfase de usuario (leds, pulsadores y buzzer).

Modo Normal: A este modo se accede cuando el controlador de carga es energizado sin mantener pulsado PROG. Este modo corresponde al funcionamiento normal, donde la carga será controlada. Si la frecuencia de la tensión generada está por encima del valor límite seleccionado en el modo configuración, como así también si la corriente consumida por la carga no supera el límite fijado en dicho modo, la carga permanecerá energizada y el led verde ON encendido de forma intermitente. En caso de que la frecuencia descienda por debajo del límite, la carga es desconectada por diez segundos, el led verde es apagado y el led amarillo BAJA FREC es encendido de forma intermitente. Durante los diez segundos también se activada el buzzer, indicando de forma audible que la carga ha sido desconectada. Durante los diez segundos mencionados, el programa continúa realizando la medición de frecuencia y corriente. En caso de que la frecuencia o la corriente no se restablezcan a los valores normales, transcurridos los diez segundos, el buzzer será apagado pero la carga permanecerá desconectada y el led correspondiente (led amarillo o rojo) seguirá encendido de forma intermitente indicando cual es la causa de desconexión. En caso de que exista el restablecimiento, pasado los diez segundos la carga es conectada nuevamente. De igual forma sucede cuando es superado el límite de corriente, nada más que será desconectada la carga y encendido de forma intermitente el led rojo ALTA CORR.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El circuito convertidor $I_{CA}-V_{CC}$ ha sido ensayado haciendo circular distintos valores de corriente a través del transformador de intensidad (indicado en la figura 4) y midiendo la tensión de salida V_S del mismo. De esta forma, se ha comprobado que el circuito presenta una linealidad óptima en el rango de corriente para el cual funcionará el controlador de carga ($0A \leq I_{CA} \leq 5A$). En la figura 6 puede apreciarse el resultado del ensayo mencionado.

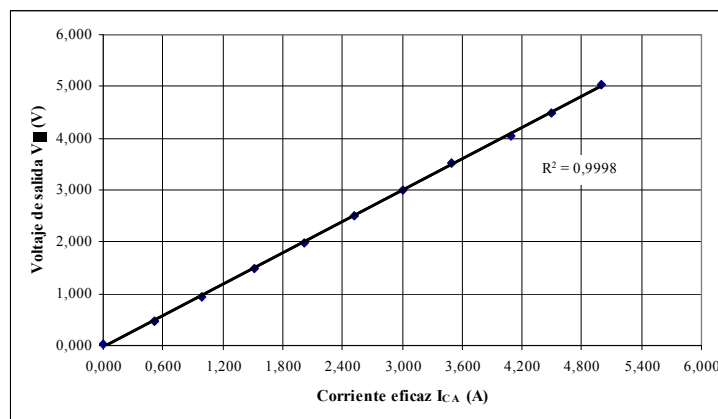


Figura 6: Relación salida-entrada para el circuito convertidor $I_{CA}-V_{CC}$.

Considerando diferentes límites de corriente, se han realizado mediciones para comprobar la exactitud en la desconexión de la carga. Los valores obtenidos pueden apreciarse en la tabla 3.

I_{CA-Lim} (A)	I_{CA} de desconexión (A)
1,05	0,95
2,10	1,95
3,05	2,92
4,10	4,15
5,00	4,95

Tabla 3: Valores de corriente de desconexión en el prototipo del controlador.

Con el fin de comprobar la respuesta del circuito ante la disminución de la frecuencia en la tensión generada, para los distintos límites de frecuencia configurables en el controlador, se obtuvieron los resultados de la tabla 4.

F_{G-Lim} (Hz)	F_G de desconexión (Hz)
46	45,95
47	46,96
48	47,95

Tabla 4: Valores de frecuencia de desconexión en el prototipo del controlador.

Como puede apreciarse, los resultados obtenidos con este circuito son aceptables, cumpliendo con las expectativas de funcionamiento.

El uso de un dispositivo programable, como lo es el microcontrolador, permite que el controlador propuesto pueda configurarse fácilmente para adaptarse a distintas condiciones de funcionamiento, como ser distintos estados de sobrecarga en el sistema de generación (distintos límites de frecuencia) o diferentes cargas de baja prioridad a controlar (distintos límites de corriente).

La utilización del controlador de carga inteligente, puede mejorar la calidad y confiabilidad en el suministro de energía eléctrica que puede proporcionar un pequeño aprovechamiento hidroeléctrico, ya que evitará condiciones de baja tensión o de apagones, ante una sobrecarga en el sistema de generación. Además, el controlador permite usar de forma más productiva la energía excedente en la carga balasto del control de frecuencia, mejorando así la eficiencia de la instalación.

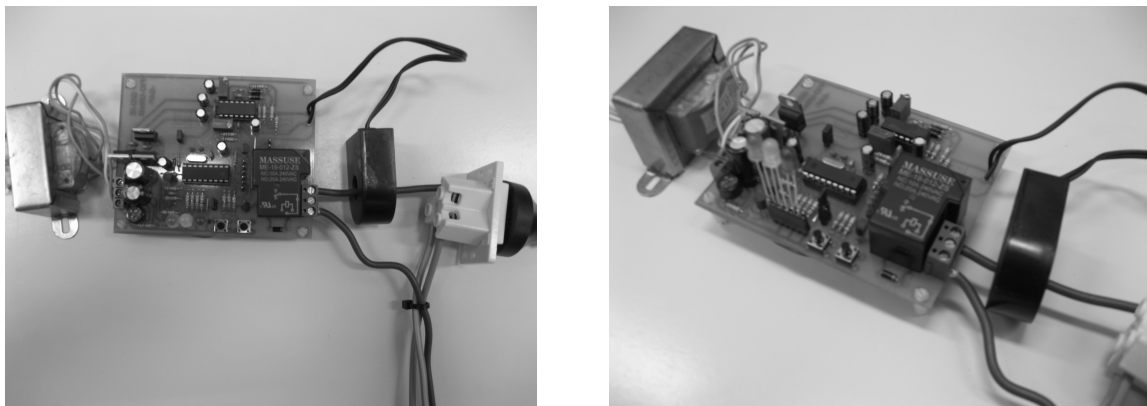


Figura 7: Fotos del controlador inteligente de carga (prototipo).

REFERENCIAS

- Angulo Usategui J. M., Romero Yesa S. y Angulo Martínez I. (2000). “Microcontroladores PIC, Diseño práctico de aplicaciones, 2ª parte”, 1ª edición, pp. 87-89. McGrawHill, Madrid.
- Kurtz V. H. y Anocibar H. R. (2005). “Sistema mixto para el control de la generación en microcentrales hidroeléctricas”. XI Encuentro Latinoamericano Sobre Pequeños Aprovechamientos Hidroeléctricos, ELPAH 2005.
- Microchip Technology Inc. (2004). “PIC16F818/819 data sheet (DS39598A)”, pp. 57-62, 81-87.
- Smith N. (2003). “Gestión inteligente de la carga en una microcentral hidroeléctrica”. Revista Hidrored (ISSN 0935-0578), número 1, año 2003, pp. 2-4.
- Torres Portero M. (1992). “Circuitos integrados lineales: sus aplicaciones”, 5ª edición, pp. 144-146. Paraninfo, Madrid.

ABSTRACT: This paper proposes an electronic circuit that allows accomplish an efficient use of the wasted energy in the control of the generation with ballast loads, used in standalone micro and pico hydel. This circuit controls the electric power supply to a low priority load, such as a heater or a water heater, allowing in this way to take advantage of a part of the energy consumed by the ballast load. The proposed controller allows feed the low priority load only when the generation system is not overloaded and when its maximum load current is not exceeded. A prototype of the proposed control circuit has been developed and implemented in lab using a low cost microcontroller. The set points to control the load can be easily programmed. The implemented prototype has shown an acceptable operation.

Keywords: Load controller, energy efficient use, micro hydel, pico hydel, PIC microcontrollers.