



VII/CE-B3-03

RETROFIT DE RECTIFICADORES TIRISTORIZADOS

Ing. Gustavo Adolfo Aguayo Rojas

Administración Nacional de Electricidad

Paraguay

RESUMEN

Se detalla el diseño de una gama de controladores digitales, basados en microcontroladores, con el objetivo de permitir la restauración y modernización de rectificadores tiristorizados de 110 y 12 Vcc, cuyos sistemas de control originales resultaran averiados, más allá de toda posibilidad de reparación, durante el servicio en subestaciones de la ANDE.

Con vistas a demostrar la viabilidad del nuevo sistema de control diseñado, se ha procedido a la implementación de un prototipo de controlador de rectificador de 12 V, el cual ha sido instalado en la subestación San Lorenzo en carácter experimental. Tal controlador, centrado en torno al microcontrolador PIC 16F876, ha sido ensamblado enteramente a partir de componentes electrónicos existentes en el mercado local, resultando en un diseño sencillo, compacto, y de bajo costo.

Se presentan ciertos ensayos de laboratorio del rectificador restaurado, así como algunos comentarios sobre su desempeño operacional en campo.

PALABRAS CLAVES

Rectificadores – tiristores – retrofit – restauración – modernización – sistemas de control – control digital – control de fase– microcontroladores.

1 INTRODUCCIÓN

Los rectificadores a base de tiristores se constituyen en la actualidad en algunos de los equipos de mayor aplicación y preponderancia en las más diversas áreas de los sistemas eléctricos, como ser: fuentes de alimentación DC, excitatrices de campo de generadores, impulsores de motores eléctricos, convertidores estáticos de frecuencia, transmisión en corriente continua o *HVDC (High Voltage Direct Current Transmission)*, entre otros sistemas de conversión de potencia. Si bien que la topología de los elementos que conforman la electrónica de potencia de los rectificadores no ha sufrido esencialmente grandes variaciones desde el advenimiento de los tiristores hace más de tres décadas atrás, lo mismo no es aplicable a los sistemas de control, ya que éstos han ido evolucionando continuamente desde la aparición de los primeros circuitos de regulación lineal, basados en circuitos analógicos. Así, en la actualidad, con el avance de los sistemas microprocesados se ha hecho posible la integración de complicados algoritmos de regulación digital junto con otras funciones como instrumentación, monitoreo, parametrización, registro de eventos, enlace remoto, entre otras.

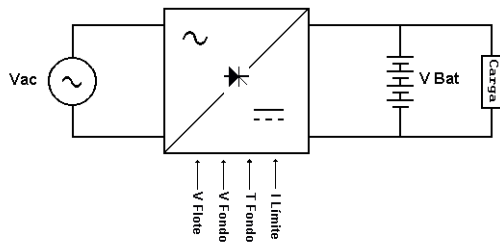
El presente trabajo versa sobre el diseño de una línea de controladores digitales universales, que podrán ser utilizados en la recuperación de rectificadores tiristorizados cuyos sistemas de control hayan resultado averiados durante el servicio, y que resulten inviables de ser reparados ya sean por falta de repuestos, falta de documentación adecuada (diagramas y planos electrónicos), a causa de obsolescencia tecnológica de sus componentes, o por motivos económicos. En carácter de demostración, un prototipo de controlador digital basado en el microcontrolador PIC 16F876, ha sido ensamblado y adaptado al sistema de potencia de un rectificador de 12 V – 20 A, cuyo controlador se había averiado en el año 2001. Se presentan algunos resultados de ensayos en laboratorio, así como del desempeño operacional en campo del rectificador recuperado, tras su instalación en la subestación San Lorenzo.

2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN RECTIFICADOR

A seguir se describe sucintamente el principio básico de funcionamiento de un rectificador de tensión constante – corriente constante (UI), del tipo utilizado en sistemas de CC. Haciendo referencia a la Fig. 1, más abajo se definen los parámetros típicos que determinan las modalidades de funcionamiento de un rectificador operando en paralelo con un banco de baterías y la carga:

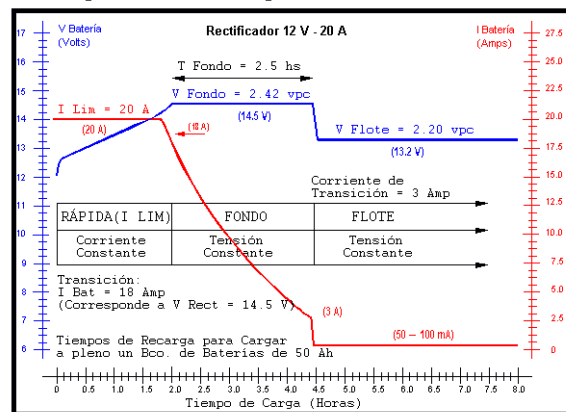
- **Tensión de Flote (V Flote):** es el nivel de tensión normal de operación de un sistema CC, y su valor es definido por el tipo y la cantidad de celdas de baterías utilizadas. La tensión de Flote tiene por finalidad reponer las pérdidas de las baterías a causa de su auto-descarga interna, manteniéndolas plenamente cargadas, a la vez de alimentar a la carga en régimen permanente.
- **Tensión de Fondo (V Fondo):** es una tensión constante -superior a la de flote-, aplicada usualmente tras un Fuera de Servicio del Rectificador, con el objetivo de reponer por completo la carga de las baterías. Así como en el caso de la tensión de Flote, su valor de ajuste es función del tipo y de la cantidad de elementos de baterías.
- **Temporización de Fondo (T Fondo):** define el tiempo de operación en carga a Fondo del Rectificador, tras lo cual, éste es conmutado automáticamente a Flote.
- **Limitador de Corriente (I Límite):** permite la recarga rápida (hasta un 80 %) de las baterías a una tasa constante de corriente, luego de que aquellas hayan sufrido una descarga profunda a causa de un prolongado Fuera de Servicio del Rectificador, o durante la carga inicial de las mismas. El valor de ajuste del Limitador de Corriente es normalmente determinado en función de la capacidad del banco de baterías.

Rectificador UI - Tensión Constante / Corriente Constante



(a)

Algoritmo Standard de Carga - Baterías Pb-Ac Ventiladas



(b)

Figura 1: (a) Rectificador UI; (b) Algoritmo Standard de Carga

3 DESCRIPCIÓN DEL CONTROLADOR DISEÑADO

En esta sección se detallan los aspectos relativos al *hardware*, *firmware* y *software* del controlador digital diseñado; el cual ha sido inicialmente implementado con el objetivo de permitir el retrofit de rectificadores de 12 V averiados, no debiendo sin embargo existir inconvenientes para su adaptación a otros niveles de tensión.

3.1 Hardware

3.1.1 Electrónica de Potencia

La electrónica de potencia, así como la carcasa y otros equipamientos de potencia, como ser el transformador, los filtros y demás equipos accesorios, correspondían originalmente a un rectificador monofásico de 12 V – 20 A, de marca Adax-Tecna, cuyo sistema de control se había averiado en el año 2001. Como se observa en la Fig. 2, la electrónica de potencia está conformada por un puente de Graetz en configuración híbrida o semi-controlada [1]; es decir con 2 tiristores y 2 diodos en el puente de rectificación. Durante el semiciclo positivo de la tensión de entrada AC los elementos que entran en conducción son el tiristor 1 (SCR 1) y el diodo 1 (D1), mientras que durante el semiciclo negativo conducen el tiristor 2 (SCR 2) y el diodo 2 (D2), produciendo una tensión CC pulsante en la salida del puente, la cual es alisada por medio del filtro conformado por el inductor L (*choke*), el capacitor C y las baterías. El diodo D3 (*free-wheeling*) permite la circulación segura de corrientes inductivas en la salida de modo a evitar el desarrollo de peligrosas sobretensiones en el momento de la conmutación de los semiconductores del puente, a más de mejorar el factor de potencia del convertidor. La regulación del nivel de tensión -y/o corriente- es provista por medio del control del ángulo de disparo α , el cual es definido como el instante, con relación al cruce por cero de la tensión AC, de aplicación de los pulsos de disparo a los terminales de *gate* de los tiristores; momento a partir del cual éstos entran en conducción. El voltaje promedio de salida de un rectificador híbrido como el de la Fig. 2 se describe matemáticamente a través de la ecuación 1 [1]:

$$V_{dc} = \frac{V_{m\acute{a}x}}{\pi} (1 + \cos \alpha) \quad (1)$$

Donde $V_{m\acute{a}x}$ es el valor de pico de la tensión de entrada AC y α representa el ángulo de disparo.

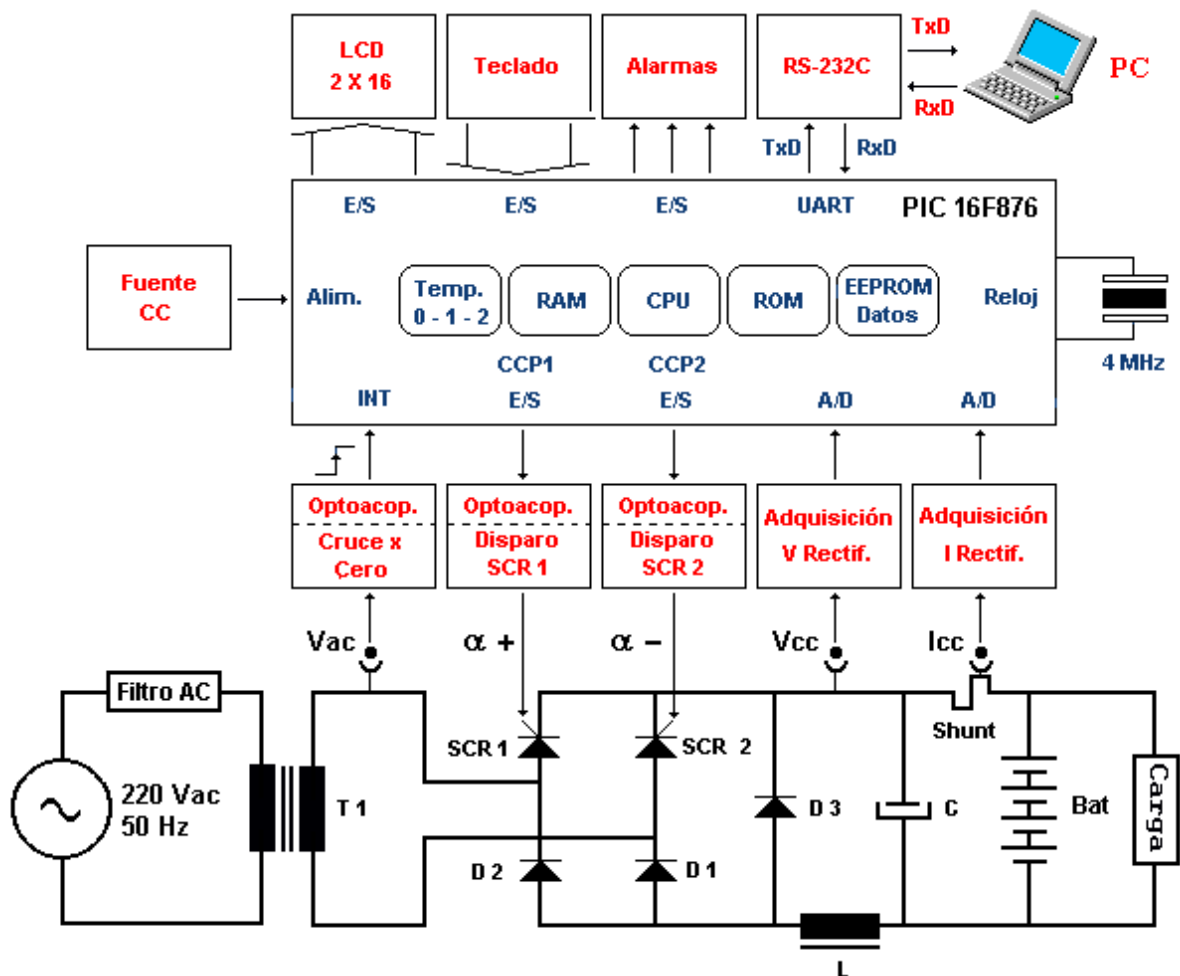


Figura 2: Hardware del Controlador y elementos de potencia del rectificador restaurado

3.1.2 Sistema de Control

El controlador del rectificador fue diseñado en torno a la plataforma del microcontrolador PIC 16F876A de Microchip [2], que posee una CPU de tipo RISC, con un potente y reducido grupo de instrucciones de 14 bits, las cuales son ejecutadas en su gran mayoría en un único ciclo de máquina. Este microcontrolador cuenta con 8 kbytes de memoria de programa (ROM), 368 bytes de RAM, 256 bytes de EEPROM de datos (memoria no volátil), 3 temporizadores, 2 canales de captura-comparación-PWM (CCP), 5 canales de conversión A/D de 10 bits, comunicación serial (UART), a la vez de estar provisto de un canal de interrupción externa (INT), y de una adecuada cantidad de canales de E/S configurables de forma independiente. Las principales etapas que conforman el sistema de control proyectado (mostrado en la Fig. 2) son descritas a seguir:

- **Fuente CC:** genera las tensiones de alimentación necesarias para los circuitos digitales (5 Vcc), así como para los circuitos de adecuación analógicos (12 Vcc). Estas tensiones auxiliares son derivadas a partir de la tensión AC, y/o por medio de la batería (si disponible).
- **Detector de Cruce por Cero:** permite la sincronización de los pulsos de disparo generados con relación a la tensión de entrada AC. Para ello, a cada cruce por cero (positivo) de la tensión AC se genera un pulso positivo que es derivado al canal de interrupción externa (INT) del microcontrolador para su detección. Para evitar cualquier interacción no deseada entre el sistema de potencia AC y los sensibles circuitos digitales existe una separación óptica entre ambos estadios.

- **Disparo SCR 1:** genera los pulsos positivos de corriente que comandan el disparo del tiristor 1 (SCR 1) durante el semiciclo positivo de la onda de tensión de entrada AC. (La unidad de *gate* del tiristor se halla acoplada ópticamente con el puerto de E/S del microcontrolador.)
- **Disparo SCR 2:** genera los pulsos positivos de corriente que comandan el disparo del tiristor 2 (SCR 2) durante el semiciclo negativo de la onda de tensión de entrada AC. (La unidad de *gate* del tiristor se halla acoplada ópticamente con el puerto de E/S del microcontrolador.)
- **Adquisición de Tensión CC (V Rectif.):** este bloque es el encargado de posibilitar la adecuación de los niveles de la tensión de salida del rectificador (0-16.5 Vcc) al rango de la tensión de entrada (0-5 V) del canal del convertidor A/D del microcontrolador, destinado a la digitalización de la tensión CC, efectuada a cada 1 ms.
- **Adquisición de Corriente CC (I Rectif.):** tiene por función adecuar los niveles de la corriente de salida del rectificador (0-20.0 A) al rango de la tensión de entrada (0-5 V) del canal del convertidor A/D del microcontrolador, destinado a la digitalización de la corriente CC, efectuada a cada 1 ms. Para ello, la corriente de salida del cargador es medida por medio de un shunt de 60 mV/20 A, provisto originalmente con el rectificador.
- **Display LCD 2 x 16:** la tensión y corriente de salida (V Rectif. e I Rectif.) son mostradas continuamente en un display de cristal líquido de 2 líneas y 16 columnas, acoplado directamente a un puerto de E/S del microcontrolador. El display también permite acceder (visualizar) la parametrización del rectificador en conjunto con el teclado (botonera).
- **Teclado:** conformado por una botonera de 4 teclas, permite la consulta y modificación de los parámetros del rectificador (V Flote, V Fondo, T Fondo, I Límite), así como la interrogación de las alarmas. La parametrización es efectuada a través de un menú desplegable de fácil navegación.
- **Alarmas:** todas las alarmas son concentradas en un relé de Falla Rectificador, para su señalización en el cuadro de alarmas y/o remota, vía RTU. También se provee de señalizaciones ópticas, por medio de LEDs, así como a través del display LCD.
- **RS-232C:** implementa la interfase TTL-RS232C, con el objeto de posibilitar la comunicación serial a 3 hilos (vía UART), entre el microcontrolador y una PC compatible. Por medio de este enlace, y a través de un programa, es posible acceder a la parametrización completa del rectificador (más detallada que por medio del teclado), y al status de todas las alarmas.

3.2 Firmware

El programa de control del rectificador fue desarrollado prácticamente en su totalidad en lenguaje C (compilador *SourceBoostC*), con la incorporación de algunas líneas de *inline assembly*. La finalidad básica del *firmware* del controlador es permitir la implementación del algoritmo de carga *Standard* descrito en la sección 2, lo cual es llevado a cabo por medio del control de fase del ángulo de disparo; a más de comandar todos los periféricos que forman parte del controlador. A seguir se describe resumidamente ambas funciones del código del controlador:

3.2.1 Regulación por Control de Fase

El principio de funcionamiento del rectificador se basa en el control en lazo cerrado del ángulo de disparo α en función de consignas de tensión (V Flote / V Fondo), o de corriente (I Límite). Para la generación de los pulsos de disparo (I_g) a un determinado ángulo α , se procede a la comparación entre una función rampa (sincronizada con la onda de tensión AC) con una recta horizontal que representa el valor del ángulo α a ser alcanzado; los pulsos de disparo son generados en los puntos de intersección entre la rampa y la recta horizontal, como se observa en la Fig. 3a), en la cual se muestran los pulsos de disparo (I_g) correspondientes a $\alpha = 135^\circ$ (1er. Ciclo) y $\alpha = 90^\circ$ (2do. Ciclo). En la práctica, la función de comparación es implementada a través de los registradores CCP (1 y 2) configurados en modo de Comparación. La función rampa es llevada a cabo por el temporizador 1, el cual es

incrementado continuamente a pasos de $1 \mu\text{s}$, y es reseteado (cerado) dentro de la rutina de la interrupción externa (INT), a cada cruce por cero de la tensión AC, para su sincronización.

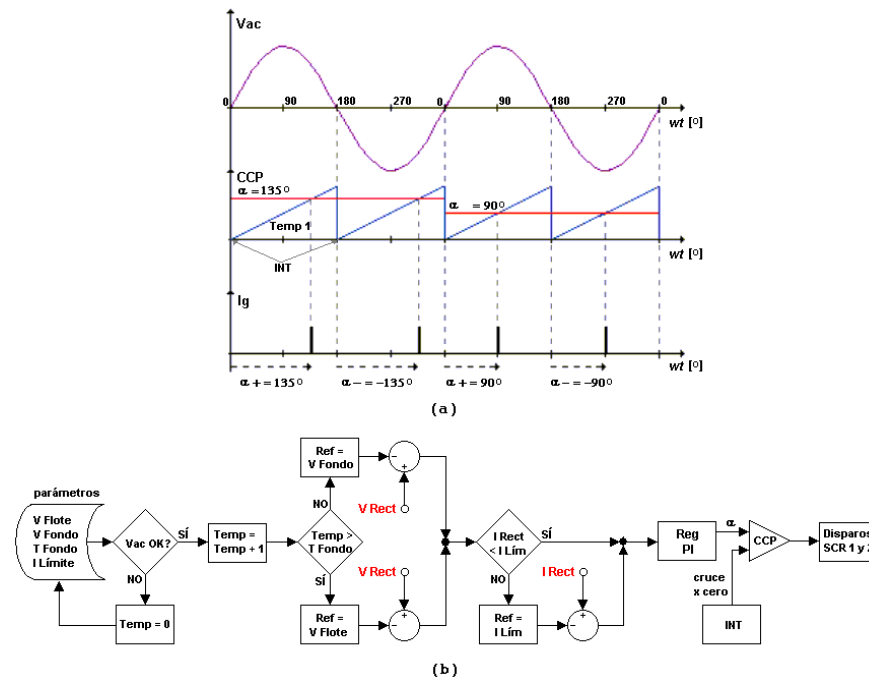


Figura 3: (a) Generación de Pulsos de Disparo; (b) Diagrama de Flujo del Regulador

Con respecto a la recta horizontal que representa el valor de α requerido, éste es obtenido a partir de un regulador PI, cuyos valores de referencia y variables de control son función del modo operativo del rectificador, lo cual por su vez obedece exactamente a la curva de carga Standard descrita en la sección 2. Así por ejemplo, haciendo referencia al diagrama de flujo de la Fig. 3b), se tiene que ante la ausencia de la tensión AC, el controlador se posiciona en un ciclo cerrado de carga de parámetros de operación -desde la memoria EEPROM- y reseteo del temporizador auxiliar Temp. De la misma manera, tras el restablecimiento de la tensión AC (Vac OK), y suponiendo que las baterías no se hayan descargado profundamente durante el Fuera de Servicio del rectificador, (con lo cual no debería existir ninguna limitación de corriente), entonces el regulador PI pasa a obtener su valor de referencia a partir de la tensión de Fondo (V Fondo), mientras que la variable a controlar es obtenida de la medición de la tensión de salida del rectificador (V Rect), para operar en carga a Fondo de modo a reponer la carga de las baterías. El regulador funcionará en este estado mientras el temporizador auxiliar Temp no alcance el valor límite de carga a Fondo, delimitado por el parámetro T Fondo, período tras el cual el controlador conmutará automáticamente a V Flote, permaneciendo en este modo indefinidamente. Ahora bien, en el caso de que las baterías se hayan descargado profundamente, éstas podrían presentar diferencias de potencial y resistencias internas sumamente bajas, con lo que, de intentarse la operación del rectificador en modo de control de tensión, podría establecerse una corriente de salida muy elevada, que en un caso extremo podría llegar a dañar las baterías y/o el puente de rectificación. Por ello, en caso que la medición de la corriente de salida del rectificador (I_{Rect}) tienda a ser mayor que el valor de I_{cc} límite ajustado, el controlador conmuta inmediatamente al modo de control de corriente, permaneciendo en dicha modalidad hasta que la corriente de salida del rectificador sea inferior a I_{Lim} . (Lo cual podría acontecer luego de que las baterías hayan recuperado buena parte de su carga, por ejemplo.)

3.2.2 Control de Periféricos

A más de las funciones de regulación y generación de disparos, el *firmware* también se encarga de controlar la operación de todos los periféricos, como el display LCD, el teclado, la comunicación

serial, las alarmas, los convertidores A/D, entre otros. Las funciones más críticas para la regulación como lo son por ejemplo la digitalización de tensión y corriente del rectificador, cálculo del ángulo α y otras, son ejecutadas cíclicamente por medio de interrupciones generadas por los temporizadores. El control de otros periféricos como el teclado y la UART serial también son gerenciados vía interrupciones de *hardware*.

3.3 Software

Para posibilitar la parametrización y monitoreo remotos vía PC, fue desarrollado un programa de comunicación serial, el cual consta de 2 etapas: una interfase hombre-máquina (Fig. 4a), y otra interfase máquina-máquina (Fig. 4b). La interfase hombre-máquina fue desarrollada en Visual FoxPro y tiene por finalidad permitir la recolección de todos los parámetros del rectificador, presentándolos convenientemente dentro de una misma ventana gráfica, para facilitar la interacción amigable entre el operador y la PC. En el momento en que los parámetros deben ser transmitidos -o recepcionados- al rectificador propiamente, éstos son direccionados al programa de interfase máquina-máquina, desarrollado en Borland C, el cual se encarga de establecer la comunicación con el microcontrolador vía puerta serial RS-232C. De esta manera se hace posible el ajuste remoto de todos los parámetros de operación del rectificador, así como el establecimiento de los niveles de alarmas y de las constantes de transformación de los canales de tensión y corriente, para su calibración (si necesario).



Figura 4: (a) Interfase Hombre-Máquina, en FoxPro; (b) Interfase Máquina-Máquina, en C

4 ENSAYOS Y PUESTA EN SERVICIO

4.1 Pruebas de Laboratorio

Desde mediados de septiembre del 2005, el rectificador restaurado con el nuevo controlador fue probado en laboratorio por espacio de varias semanas. Más abajo se incluyen los resultados de algunas de tales pruebas, captadas por medio de un osciloscopio digital.

- Prueba de Arranque:** el algoritmo de inicialización del rectificador incorpora una rutina de arranque suave, que tiene por finalidad proveer un encendido controlado y sin sobresaltos, por medio del aumento gradual de la tensión del rectificador hasta que éste alcance su punto de operación nominal. En la Fig. 5a) se muestran las formas de ondas de la tensión AC, de la tensión de salida del rectificador ($V_{\text{Rect}} = 3.4 \text{ V}$), así como los pulsos de disparo positivos y negativos ($\alpha \approx 144^\circ$), captados segundos después del encendido en vacío del rectificador. Ya en la Fig. 5b) se incluyen las mismas curvas, pero una vez concluido el proceso de arranque, tras alcanzarse el valor de Fondo ($V_{\text{Rect}} = 14.4 \text{ V}$), con ángulos de disparo de alrededor de 65° ($\alpha \approx 65^\circ$).

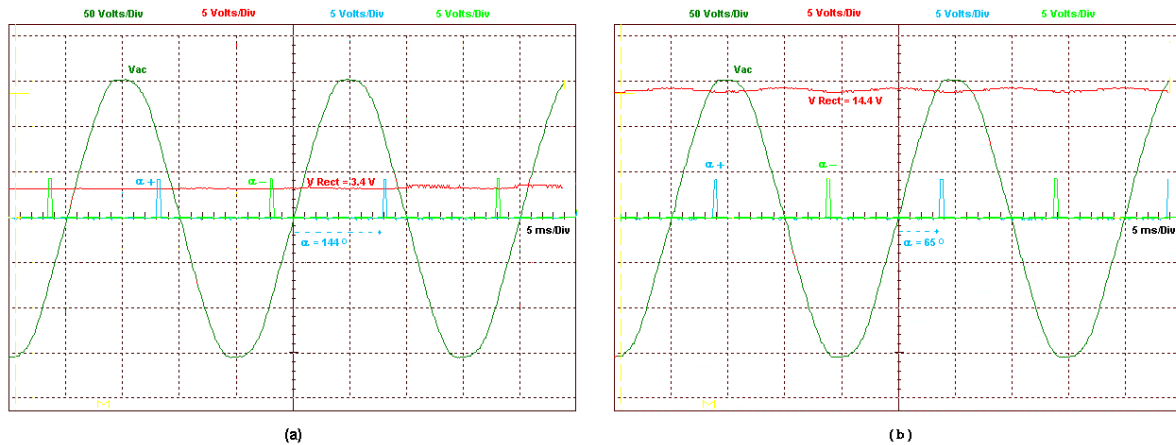


Figura 5: (a) Arranque: $V_{\text{Rect}} = 3.4 \text{ V}$ ($\alpha \approx 144^\circ$); (b) Fondo: $V_{\text{Rect}} = 14.4 \text{ V}$ ($\alpha \approx 65^\circ$)

- Ensayos de Tomada / Rechazo de Carga:** con el objeto de comprobar el desempeño del regulador, el rectificador fue sometido a una serie de pruebas de tomada/rechazo de cargas. En la Fig. 6a) se muestra la respuesta del rectificador ante una súbita incorporación de 12 A en la salida. Como se ve en el oscilograma, la adición de la carga ocasiona originalmente un SAG de unos 2.2 V, y unos 650 ms después la tensión ya se sitúa nuevamente en torno a la nominal, como resultado de la acción reguladora del controlador. En la Fig. 6b) se muestra el comportamiento dinámico del rectificador durante un repentino rechazo de carga de 12 A.

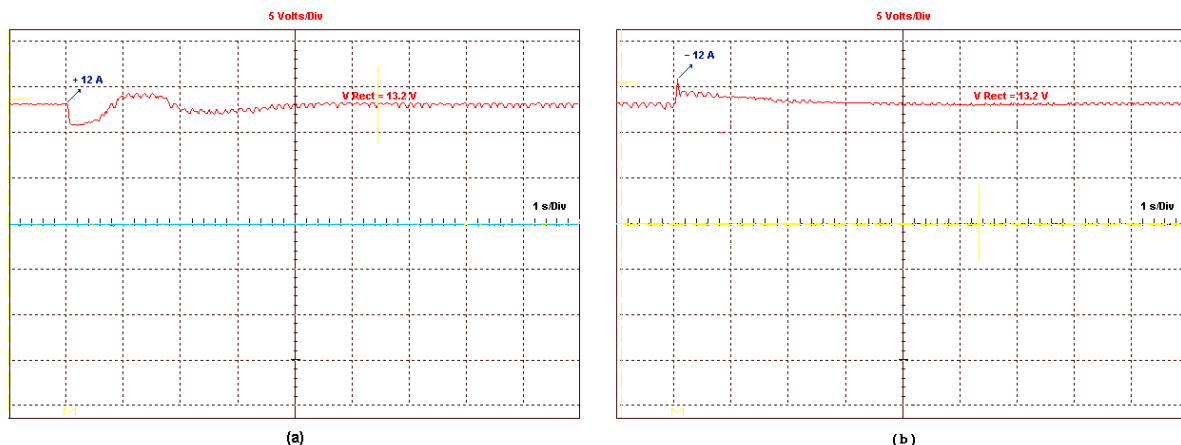


Figura 6: (a) Tomada de Carga: + 12 A; (b) Rechazo de Carga: - 12 A

4.2 Puesta en Servicio

El 7 de octubre del 2005, el rectificador reacondicionado fue instalado en la estación San Lorenzo, como fuente de CC de varios de los sistemas de comunicación de tal local, como ser: sistema de microondas (voz y datos), repetidora de telefonía, equipos de radio. Una vez en servicio, el rectificador estuvo operando satisfactoriamente por espacio de más de once meses, hasta el 9 de septiembre del 2006, cuando una tormenta con descarga atmosférica averió varios de los equipos de comunicaciones (radios, repetidoras, otros), afectando asimismo al rectificador y averiándolo en su canal de adquisición de corriente, motivo por el cual el mismo tuvo que ser desmontado para su reparación; la cual fue llevada a cabo inmediatamente tras el cambio del componente afectado (amplificador operacional de adquisición de corriente). La raíz de las averías detectadas en los equipos de comunicación así como en el rectificador, habría sido el incorrecto (incompleto) aterramiento de los sistemas de comunicación, al no haberse interconectado las mallas de tierras de unos equipos de comunicación (nuevos) con la malla de tierra de la estación (que sirve al rectificador.)

5 CONCLUSIONES

- Ha quedado demostrada la factibilidad del reemplazo de los sistemas de control originales de rectificadores averiados, por los nuevos controladores digitales diseñados.
- Con ello, se torna viable la reparación o la restauración de una buena cantidad de rectificadores antiguos, los cuales se hallan indisponibles en la actualidad por fallas de control.
- El nuevo controlador concebido, al ser de diseño digital, sustenta su funcionalidad en el *firmware* y *software* de control, resultando en una implementación (*hardware*) simple, reducida, y de bajo costo.
- Dado que los componentes utilizados en el sistema de control se encuentran íntegramente disponibles en el mercado local, y puesto que su diseño se halla totalmente abierto, no debería existir inconvenientes para su mantenimiento y reparación futuros.
- El diseño del controlador servirá como plataforma para la realización de cursos de entrenamiento en control digital de sistemas CC, a ser impartidos a futuro en la ANDE.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Rashid, Muhammad, *Power Electronics: Circuits, Devices and Applications*, Prentice Hall, 2nd edition.
- [2] Microchip, *PIC16F87XA Data Sheet*.