

# **DOCENCIA DE LOS AMPLIFICADORES MAGNÉTICOS SATURABLES EN LA ASIGNATURA DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA**

*Mikel Alberro Astarbe<sup>1</sup>, Pello Aiestaran Matxinandiarena<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Escuela Universitaria Politécnica de San Sebastián E.U.P-SS. [jtpalasm@sp.ehu.es](mailto:jtpalasm@sp.ehu.es)

<sup>2</sup>Escuela Universitaria Politécnica de San Sebastián E.U.P-SS. [jtpaymap@sp.ehu.es](mailto:jtpaymap@sp.ehu.es)

## **RESUMEN**

En este trabajo se expone el funcionamiento de los amplificadores magnéticos saturables y de los circuitos de Fuentes de Alimentación Conmutadas (FAC) de múltiples tensiones de salida que utilizan los fabricantes, la laguna existente en los programas de la asignatura de Electrónica de Potencia sobre estos componentes y como formar a los alumnos sobre los amplificadores magnéticos saturables exponiendo los conocimientos teóricos necesarios y realizando unas prácticas de laboratorio donde se vea el funcionamiento de los mismos.

## **1. INTRODUCCIÓN**

En la actualidad, se observa la tendencia de los fabricantes de FAC a incluir en sus circuitos amplificadores magnéticos cuando es preciso suministrar una elevada corriente a la salida [1] [2] [3] ya que estos amplificadores simplifican el circuito y permiten una mayor frecuencia de conmutación.

Por el contrario, dentro de los programas de la asignatura de Electrónica de Potencia en las Escuelas de Ingeniería Técnica, este tema no aparece reflejado y deja al alumno con una carencia en su formación. Igualmente, los libros de texto más utilizados como bibliografía de dicha asignatura, no tratan el tema de los amplificadores magnéticos [4] [5] [6] [7].

Este trabajo muestra cómo con unos pocos conocimientos previos, adquiridos en otras asignaturas, y los conocimientos básicos de FAC de la asignatura de electrónica de potencia, el alumno puede comprender fácilmente estos amplificadores.

En sucesivos apartados se explica el funcionamiento y aplicaciones de estos amplificadores.

## **2. TÉCNICAS DE REGULACIÓN EN FAC DE MÚLTIPLES TENSIONES DE SALIDA**

A pesar de su nombre, la función de los amplificadores magnéticos no está relacionada con la amplificación magnética. Estos amplificadores pueden modelarse como inductancias saturables y su componente principal, cuando trabajan como reguladores, es la inductancia saturable, que actúa a modo de interruptor magnético. En funcionamiento presenta una característica de alta impedancia durante el periodo de bloqueo (“switch off”) y una característica de baja impedancia cuando el componente está en saturación (“switch on”).

Los núcleos más utilizados para las inductancias saturables son los que presentan un ciclo de histéresis BH rectangular. Estos núcleos pueden ser de varios tipos:

- Núcleos toroidales de Ferrita
- Núcleos de Permalloy 80
- Núcleos de materiales amorfos basados en cobalto

Estos núcleos son adecuados para controlar las salidas individuales de las FAC con varias salidas, desde unos pocos vatios hasta unos cientos de vatios que trabajen a frecuencias de conmutación entre 20kHz y 100kHz.

### 3. CIRCUITOS DE APLICACIÓN DE LOS FABRICANTES

Una aplicación muy difundida entre los fabricantes es la utilizada en las FAC de varias tensiones de salida, es la que propone SSS-MAGNETICS (Figura 1).

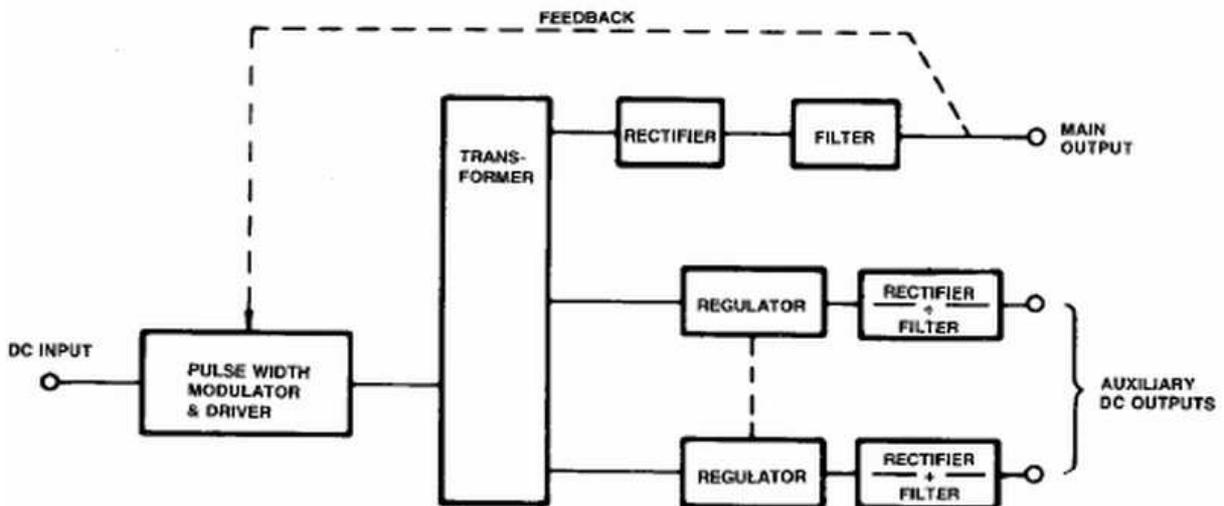


Figura 1. Configuración básica de una FAC regulada mediante amplificador magnético

Las salidas auxiliares se conectan a las tomas intermedias del secundario y se regulan mediante amplificadores magnéticos. Estos amplificadores están compuestos por una bobina y un núcleo. En función del tipo de núcleo, el amplificador presenta una determinada respuesta en el ciclo de histéresis. Los núcleos de Permalloy 80 son los más utilizados por los fabricantes ya que presenta una respuesta rectangular en el ciclo de histéresis y proporciona un retardo controlado al flanco ascendente al comienzo de los semiciclos de pulso positivos del secundario del transformador.

De este modo, se pueden controlar una o más salidas independientemente y se consigue su regulación con precisión sin presentar las inevitables pérdidas de los reguladores lineales o la complejidad de los reguladores conmutados convencionales.

En la Figura 2 se muestra la regulación mediante un amplificador magnético saturable en una topología Forward. Esta misma técnica de regulación se puede utilizar en las topologías Flyback o Push-Pull.

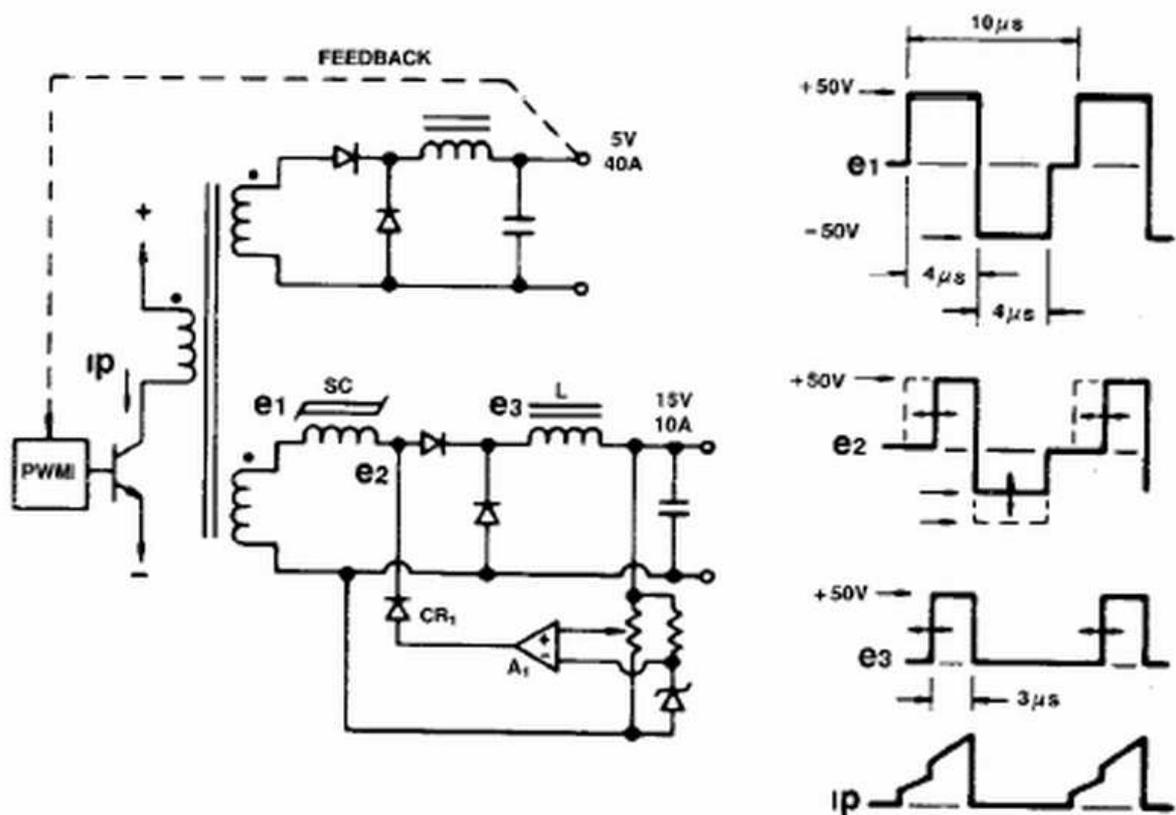


Figura 2. FAC en configuración Forward.

En el modulador de anchura de pulso, la anchura de los pulsos del primario del transformador se controla mediante la comparación de la salida principal de 5V con la referencia y se utiliza la señal de error para ajustar la duración del pulso PWM.

Para obtener 15V en la salida auxiliar, el valor medio de la tensión rectificadora aplicada a la inductancia L, debería ser 15V. Si la amplitud de los pulsos de tensión aplicada es de 50V y los periodos de repetición de  $10\mu\text{s}$  ( $f_s=100\text{kHz}$ ), la anchura del pulso positivo necesaria en  $e_2$  es:

$$PW = (15V/50V)10\mu\text{s} = 3\mu\text{s}$$

Como los pulsos en  $e_1$  tienen una anchura de  $4\mu\text{s}$ , el amplificador magnético saturable debe introducir un retardo de  $1\mu\text{s}$  al semiciclo positivo que proviene de  $e_1$  para que en  $e_2$  se obtenga un semiciclo positivo de la anchura deseada de  $3\mu\text{s}$ .

Partiendo de que la amplitud de los pulsos en  $e_1$  es de 50V, se puede afirmar que el amplificador magnético saturable deberá soportar 50V durante  $1\mu\text{s}$  o  $50V\cdot\mu\text{s}$ . Para poder llevar a cabo esto, en  $e_2$  el núcleo se pone a cero (reseteado) durante cada semiciclo negativo por un área de tensión equivalente al área del semiciclo positivo del siguiente modo.

Tan pronto como  $e_1$  conmuta al semiciclo negativo, el diodo CR1 conduce y permite al amplificador de error A1 afianzar (clamp) la salida  $e_2$  del núcleo a un valor de  $-37.5V$ . El resultado es que el núcleo es sometido a una tensión inversa de  $50V-37.5V$  por una duración de  $4\mu s$ , produciendo un reset de:

$$\Lambda = 12.5V \cdot 4\mu s = 50 V \cdot \mu s$$

$\Lambda$  representa el producto de la tensión por el tiempo que tiene que soportar el amplificador magnético.

Como la salida varía, el amplificador de error variará este valor para asegurar que la salida es regulada a  $15V$  de continua a pesar de posibles cambios en las caídas de tensión en el rectificador, etc.

La forma de onda de la corriente del primario  $i_p$ , muestra el incremento de corriente cuando el núcleo del amplificador magnético SC se satura y comienza a entregar corriente a la inductancia de salida L.

Esto conlleva una ventaja extra: al saturarse SC y comenzar a solicitar corriente del primario, el transistor de conmutación del primario ya estaba conmutado dentro de un estado ON y por lo tanto la salida de  $15V$  no ha contribuido en las pérdidas de conmutación del transistor en su paso de OFF a ON.

El fabricante Philips [3] propone utilizar núcleos toroidales de material ferrita 3R1, que tienen un ciclo de histéresis rectangular y al mismo tiempo son robustos y estables (Figura 3).

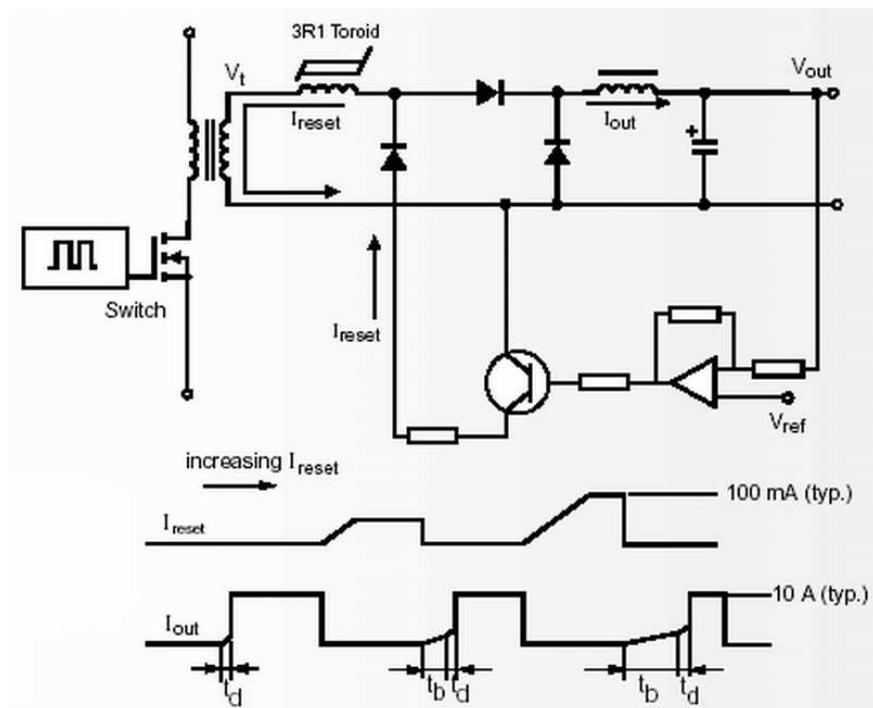


Figura 3. Regulador Forward

Los principios de operación del circuito de la Figura 3 son los siguientes:

Cuando el interruptor principal esta en ON (ton) la corriente de salida Iout atraviesa el amplificador magnético llegando a la inductancia del filtro LC y de aquí a la carga.

Durante el intervalo OFF (toff) la corriente de salida Iout y el campo magnético H decrecen hasta cero. A causa de que la inductancia saturable 3R1 tiene un ciclo de histéresis B-H rectangular, la densidad del flujo magnético permanece a un nivel alto Br incluso cuando la intensidad del campo magnético H cae a cero.

Mientras no se aplique ninguna corriente de reset (I reset) a la inductancia saturable, la densidad del flujo magnético permanece a un nivel Br mientras se completa un ciclo completo  $T=1/f$ , hasta que comience un nuevo ciclo con un nuevo ton .

Al comenzar el nuevo ton, existe un breve retardo (td) ya que la densidad del flujo magnético B tiene que subir solamente desde Br hasta Bs.

Tras esto la corriente Iout crece bruscamente hacia su valor máximo, limitada solamente por la impedancia de la carga. La tensión de salida tiene su valor máximo dado por:

$$V_{out} = V_t \times (ton - t_d) / T$$

Cuando la tensión Vout es más alta que Vref una corriente de reset circula a través de la inductancia saturable 3R1 durante toff, regulada por el transistor secundario. Esta corriente solo puede circular a través del bobinado de la inductancia saturable 3R1.

Ya que esta corriente de reset (Ireset) induce un campo magnético en sentido inverso, alejará a la ferrita 3R1 de la saturación positiva. Resetearea a esta hacia -Hc, y a causa del gran salto de la densidad del flujo magnético desde +Bs hasta -Bs se tendra un retardo tb en la corriente Iout.

El reset completo causa un gran salto de la densidad del flujo magnético desde +Bs hasta -Bs, resultando el retardo máximo (td+tb) y bloqueando la mayor parte de energía que circula desde el transformador hacia la carga.

La tensión de salida es regulada al nivel requerido y esta dada por:

$$V_{out} = V_t \times (ton - t_d - t_b) / T$$

De este modo una corriente de reset de 100mA puede regular corrientes de 10A de carga o más, dependiendo de la composición y características tensión-tiempo que es capaz de soportar el amplificador magnético .

Por esta razón el circuito descrito se llama regulador magnético o amplificador magnético.

#### 4. CIRCUITO DE PRUEBA PARA EL LABORATORIO

La empresa Coilcraft [8] propone utilizar el circuito de la Figura 4 para medir el producto tensión-tiempo que es capaz de soportar cada núcleo de los amplificadores magnéticos, asimismo la misma empresa suministra componentes sin coste alguna para profesores y estudiantes a través de la web.

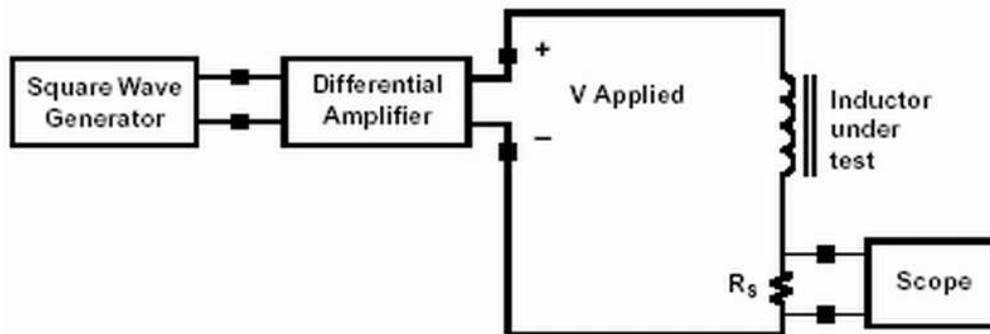


Figura 4. Circuito de prueba para los amplificadores magnéticos.

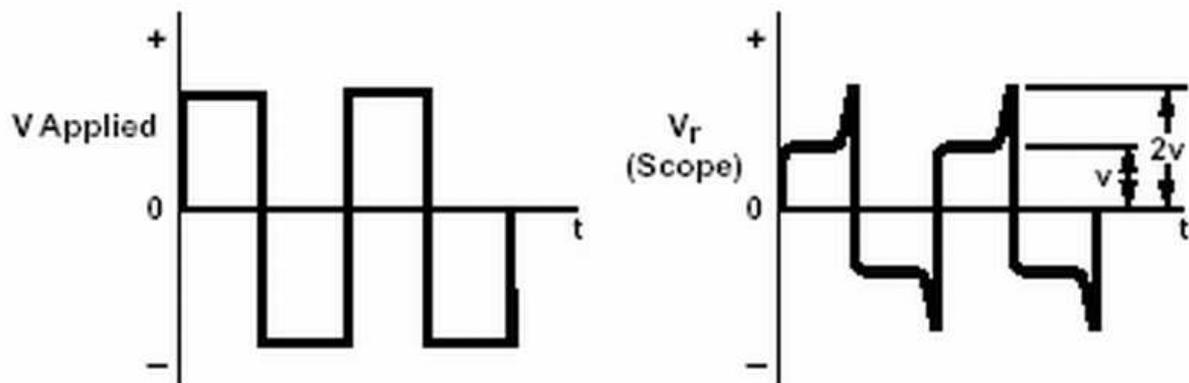


Figura 5. Señales de prueba ideales del circuito de prueba para los amplificadores magnéticos

Para medir el producto tensión-tiempo el fabricante aconseja aplicar una onda de tensión alterna cuadrada a la bobina amplificadora magnética, y observar la forma de onda de corriente a través de ella mediante la tensión en bornes de una resistencia de potencia entre  $0.1\Omega$  y  $10\Omega$  no bobinada. Se incrementa la amplitud de la tensión aplicada hasta que aparezca un pico al final de cada semiciclo, el cual indicara la saturación del núcleo. Siendo las formas de onda ideales las representadas en la Figura 5.

La saturación esta definida como el punto en el cual el pico de tensión en la resistencia serie toma un valor que dobla el del valor de pico de la onda cuadrada medida en la misma.

Para obtener el producto tensión-tiempo, se debe multiplicar la amplitud de la tensión cuadrada aplicada por el tiempo requerido para alcanzar la saturación y dividir por dos.

La resistencia serie debe ser tan pequeña como sea posible, sin sobrecargar la fuente de onda cuadrada. Si el generador de onda tiene potencia suficiente, el amplificador diferencial puede no ser necesario.

Las figuras 6 y 7 muestran las señales de prueba obtenidas con la bobina G6421-A que el fabricante especifica con un producto tensión-tiempo de 93 V- $\mu$ s para 1A de corriente.

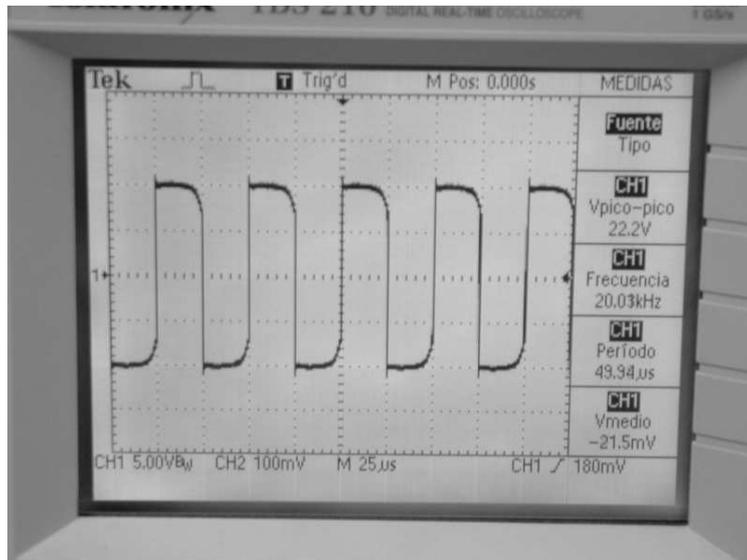


Figura 6. Tensión aplicada a la carga LR con bobina G6421-A

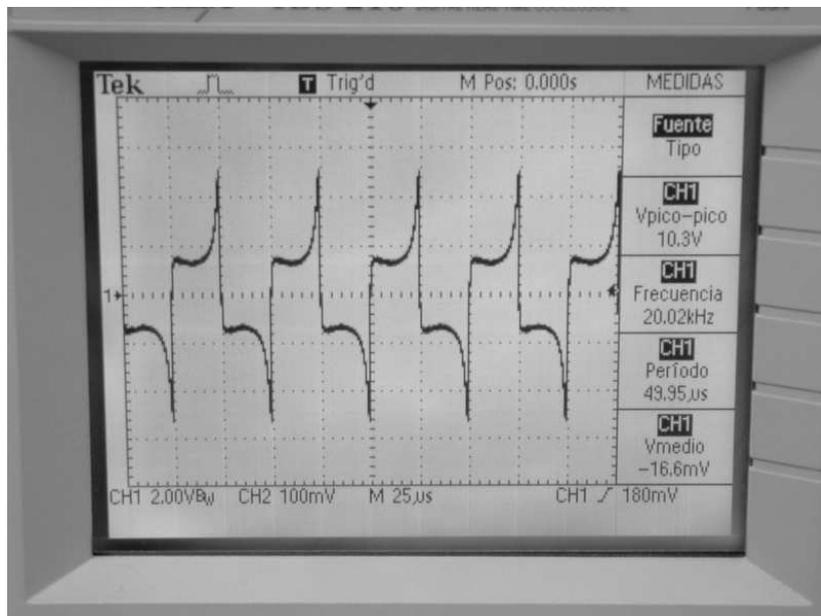


Figura 7. Corriente a través de la bobina G6421-A

Observando las figuras 6 y 7 tensión aplicada y el tiempo requerido para llegar a la saturación tenemos un producto tensión-tiempo de:  $10V \times 18.75\mu s / 2 = 93.375 V-\mu s$

Las figuras 8 y 9 muestran las señales de prueba obtenidas con la bobina G6425-A que el fabricante especifica con un producto tensión-tiempo de 66 V- $\mu$ s para 5A de corriente.

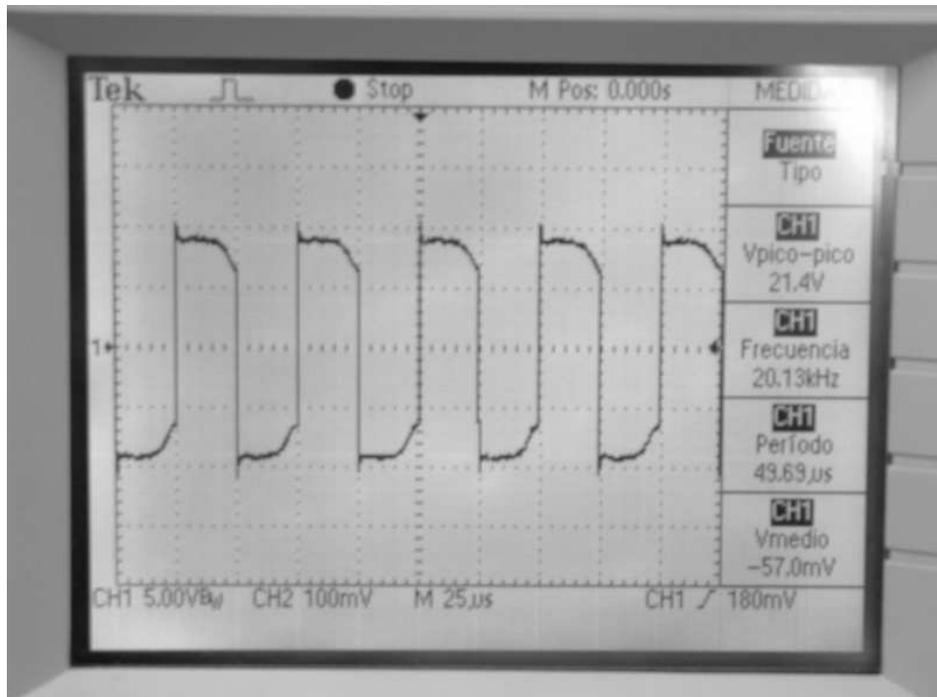


Figura 8. Tensión aplicada a la carga LR con bobina G6425-A

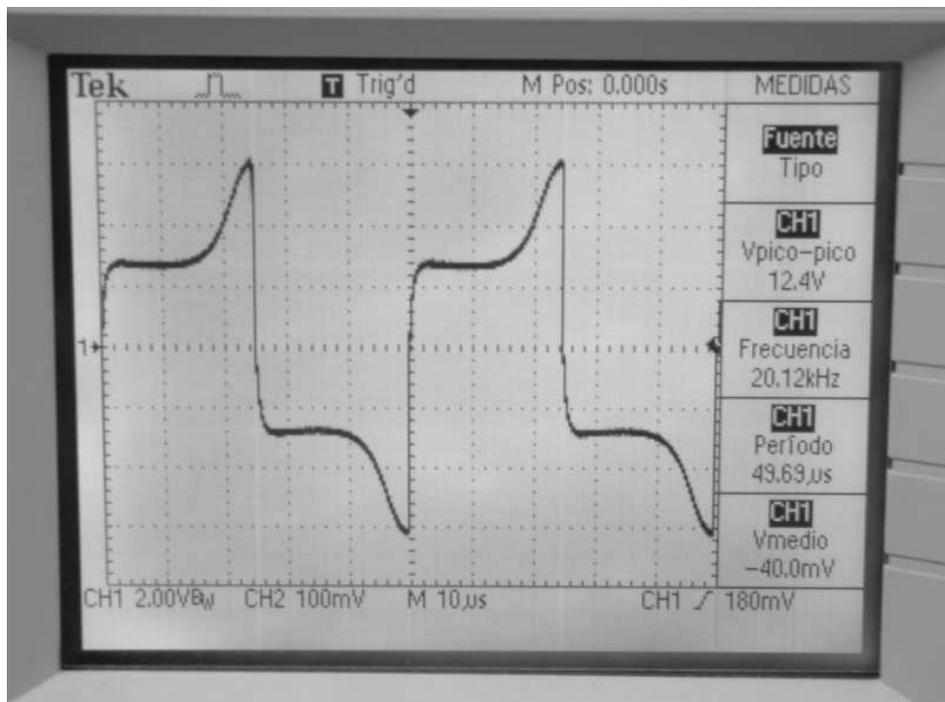


Figura 9. Corriente a través de la bobina G6425-A

Observando las figuras 8 y 9 tensión aplicada y el tiempo requerido para llegar a la saturación tenemos un producto tensión-tiempo de:  $9V \times 22\mu s / 2 = 99 V-\mu s$

## 5 CONCLUSIONES

Sin emplear muchas horas docentes ni grandes medios económicos, es posible abordar el tema de los amplificadores magnéticos actualmente utilizados en las FAC comerciales en la asignatura de Electrónica de Potencia.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Lentini & T. Sampieri,, “Magnetic Amplifier with LPR30 controller (1997)”, SGS-THOMSON AN904, [http://www.eetasia.com/ARTICLES/2000JUN/2000JUN19\\_AMD\\_AN3.PDF](http://www.eetasia.com/ARTICLES/2000JUN/2000JUN19_AMD_AN3.PDF)
- [2] SSS-MAGNETICS, “Mag Amp Cores and Materials (1999)”, BULLETIN SR-4, [www.mag-inc.com](http://www.mag-inc.com)
- [3] “Square Loop Ferrite Toroids for Magnetic Amplifiers”. Disponible en: [www.elnamagnetics.com/library/square.pdf](http://www.elnamagnetics.com/library/square.pdf)
- [4] Muhammad Rashid ‘Electrónica de Potencia : Circuitos, dispositivos y aplicaciones ’ Editorial: Prentice Hall (1993)
- [5] Daniel W.Hart ‘Electrónica de Potencia’, Editorial: Prentice Hall (2001)
- [6] Mohan/Undeland/Robins ‘Power Electronics: Converters, applications and Design’ Editorial: John Wiley & Sons (1995)
- [7] J.Michael Jacob ‘Power Electronics: Principles & Applications’ Editorial: Delmar -Thomson Learning (2002) (1st Edition)
- [8] <http://www.coilcraft.com/ds/pwrmag.pdf>, Document 140-1