

PID 6065

## Diseño y evaluación de las fuentes de corriente para las lentes de un microscopio electrónico de transmisión

Caussi, Marcos Damián; Machado, Martín Eduardo; Balducci, Fernando; Vilá, José Félix

AUTORES: Laboratorio de Microscopía, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Entre Ríos, Argentina.

CONTACTO: [jfvila@bioingenieria.edu.ar](mailto:jfvila@bioingenieria.edu.ar)

### Resumen

Dentro del programa de actualización del microscopio electrónico Hitachi HU11-C una parte esencial consiste en adaptar al equipo un sistema de control por medio de una computadora personal. Para lograr ese objetivo es necesario controlar las lentes electromagnéticas a partir de los datos enviados desde la computadora. El microscopio tiene cinco lentes electromagnéticas principales, para cada una de las cuales se desarrollaron fuentes de corriente controladas electrónicamente. Se emplean circuitos operacionales para realizar la estabilización de los valores de corriente y transistores FET para el manejo de la carga. Las fuentes de corriente se alimentan a partir de fuentes estabilizadas de tensión, para las que se emplean reguladores integrados y prereguladores con transistores bipolares. Los circuitos se probaron inicialmente sobre *protoboard* y se evaluaron con valores crecientes de carga. Finalmente se construyeron las placas definitivas y se realizaron las pruebas sobre los devanados de las lentes del microscopio. Tanto las fuentes de tensión como de corriente mostraron en los ensayos una excelente estabilidad ante variaciones de la alimentación y de la carga. También se evaluó la estabilidad de las corrientes en función del tiempo. En la prueba final, con el microscopio en condiciones normales de operación alimentado con los circuitos desarrollados, se obtuvo imagen de forma normal y se mantuvo el foco durante intervalos de tiempo suficientemente largos a los fines prácticos.

**Palabras clave:** microscopía electrónica; microscopio electrónico de transmisión; fuentes de corriente; fuentes de tensión

### I. Introducción

En el marco de un programa de actualización del equipamiento del Laboratorio de Microscopía, se desea realizar el control de un microscopio electrónico de transmisión Hitachi HU11C por medio de una computadora personal (PC).

La primera experiencia tendiente a lograr este objetivo consistió en la realización para ese microscopio electrónico de un medidor de magnificación basado en PC (Polifeme *et al.*, 1998) (Vilá-Balducci, 2002).

El equipo posee cinco lentes electromagnéticas principales y algunas lentes auxiliares. Una etapa esencial en el proceso de control es permitir la operación de esas lentes desde la computadora, lo cual requiere el desarrollo, para cada una de las mismas, de fuentes de corriente que admitan dicho control. Estas fuentes de corriente se desarrollaron en 1998, como Proyecto Final de la carrera de Bioingeniería, para las cinco lentes principales (Polifeme-Tolaba, 1998). En 1999 se realizó la implementación y

puesta en funcionamiento de los circuitos electrónicos correspondientes (Polifeme *et al.*, 1999).

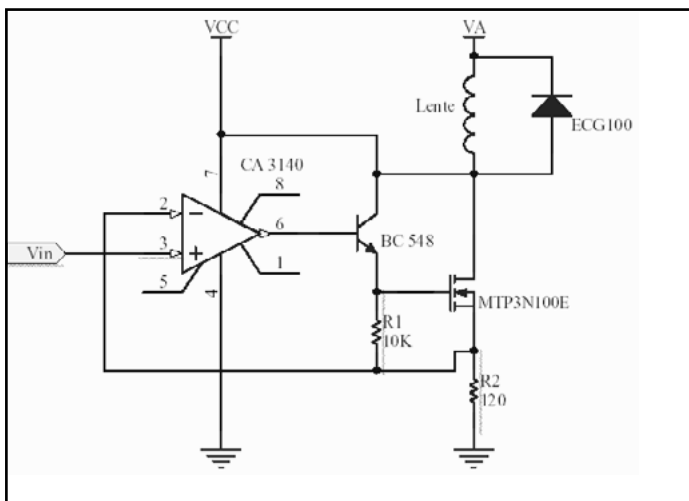
En este artículo se expone una actualización de los circuitos desarrollados anteriormente, de manera que éstos se adecuen a las condiciones actuales de funcionamiento del microscopio. También se presenta el diseño e implementación de las fuentes de tensión continua necesarias para proporcionar el voltaje requerido por los devanados del microscopio para el correcto funcionamiento de las fuentes de corriente. Asimismo, se realiza una evaluación de las mismas en términos de regulación y estabilidad. Finalmente se realiza una valoración del funcionamiento del microscopio con los nuevos circuitos.

## II. Materiales y Métodos

El trabajo se dividió en etapas para facilitar el desarrollo del mismo. En primer lugar se revisó minuciosamente el diseño realizado por Polifeme y Tolaba, realizando las actualizaciones pertinentes. Se procedió entonces a implementar en banco una de las fuentes de corriente y someterla a rigurosas pruebas para evaluar su funcionamiento. A continuación se procedió al diseño de las fuentes de tensión para cada una de las fuentes de corriente y a su implementación en banco. En la siguientes etapas se construyeron los conjuntos fuente de corriente – fuente de tensión y se probaron en banco para evaluar su funcionamiento. Finalmente se alimentaron con los circuitos construidos los devanados de las lentes del microscopio electrónico para la prueba final.

### II.1. Revisión del diseño de Polifeme y Tolaba

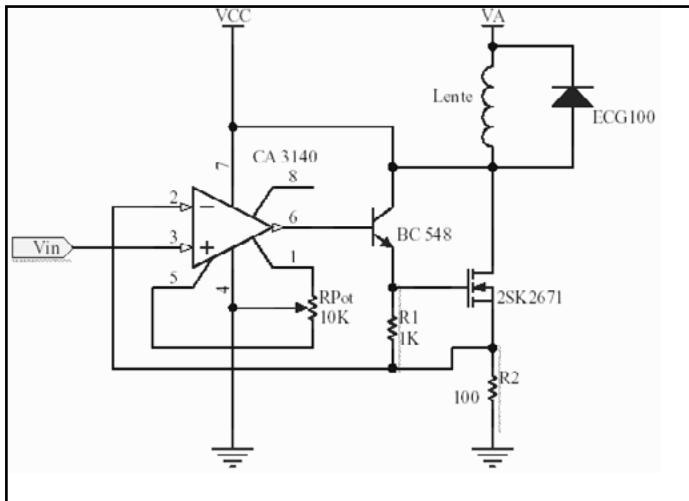
Se tomó como punto de partida para realizar las fuentes de corriente el diseño realizado por Polifeme y Tolaba (Fig. 1). El mismo fue sometido a revisión con el fin de corroborar sus prestaciones y actualizar los componentes utilizados. Algunos parámetros de diseño que se relacionan con el funcionamiento del microscopio se habían tomado originalmente de los manuales técnicos proporcionados por el fabricante (Hitachi, 1964); éstos no coinciden con los valores reales, por lo que fue necesario corregir los mismos. Estos parámetros son la impedancia de los devanados, la tensión de referencia y el voltaje de alimentación de las lentes. El circuito definitivo se muestra en la Figura 2.



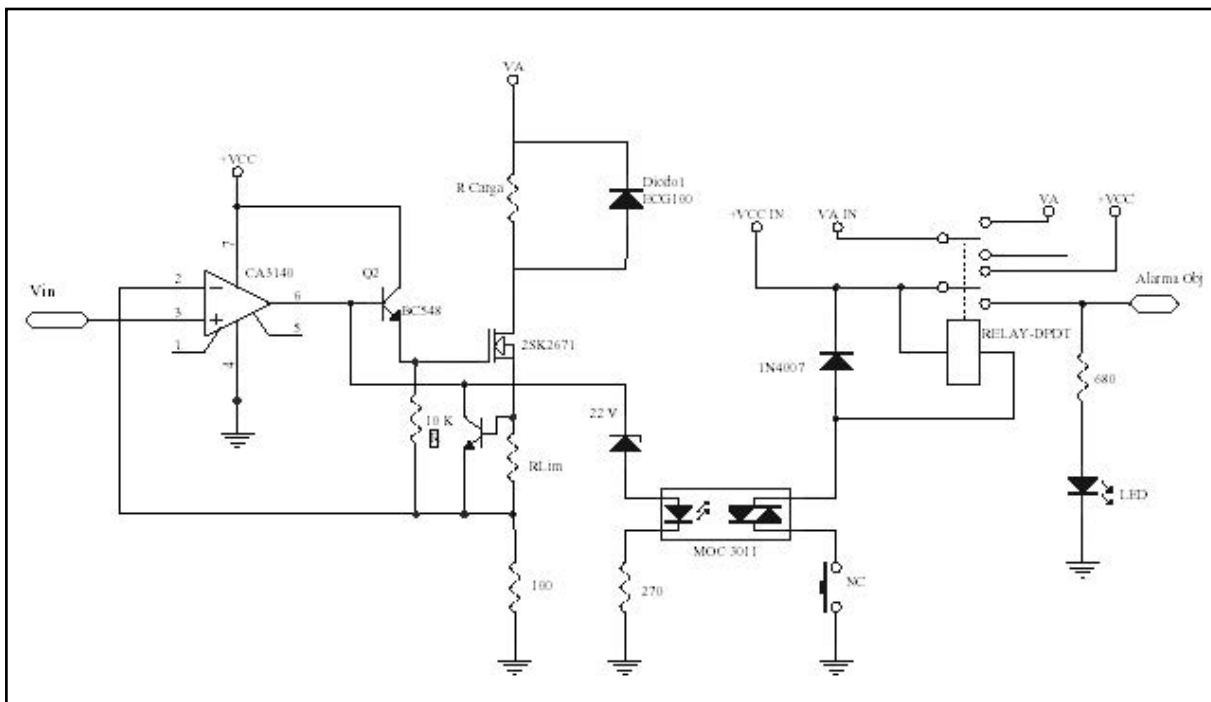
**Fig. 1.** Circuito original de fuente de corriente

Se dispuso una protección contra sobretensiones a la salida del amplificador operacional en previsión de la ocurrencia de fallas que hagan llegar la tensión de alimentación de la lente a las etapas de baja tensión del circuito. En un caso como éste se dispara un relé que levanta las tensiones de alimen-

tación del circuito en falla. Para esta protección no es necesario realizar el diseño de manera que cada lente esté protegida contra niveles de sobretensión diferentes; por lo tanto se dispuso un circuito único para todas las lentes (Fig. 3).



**Fig. 2.** Circuito definitivo de fuente de corriente



**Fig. 3.** Circuito de fuente de corriente con protecciones incluidas.

## II.2. Implementación en banco de una de las fuentes de corriente

El prototipo de la fuente de corriente se desarrolló en un principio en *protoboard* y se probó en banco, con tensiones de alimentación bajas y cargas pequeñas en relación con las resistencias reales de los devanados de las lentes electromagnéticas. Con esto se pretendía comprobar la capacidad del circuito para entregar una corriente estable dentro del rango de valores previsto.

Se realizaron varias pruebas, estableciendo un valor de corriente y comprobando la estabilidad de la misma ante variaciones de la tensión de alimentación y de la carga resistiva. Para la comprobación de estas variables se utilizó un multímetro digital Wavetek DM27XT de 4 1/2 dígitos y un osciloscopio Tektronik TDS 210.

La prueba final de las fuentes de corriente se debía realizar sobre las cargas reales de los devanados de las lentes. Como los valores de resistencia de los devanados sólo permiten establecer las corrientes deseadas alimentando con tensiones más altas (Tabla I), fue necesario construir previamente las fuentes de alimentación para cada lente.

Lente	R de manual [4]	R Real	Corriente Máx.	Tensión de alim.(Va)
Condensadora 1	850 $\Omega$	892 $\Omega$	150 mA	158 V
Condensadora 2	1800 $\Omega$	1908 $\Omega$	120 mA	253 V
Objetiva	2850 $\Omega$	3194 $\Omega$	160 mA	524 V
Intermedia	1550 $\Omega$	1623 $\Omega$	160 mA	300 V
Proyectora	2300 $\Omega$	2380 $\Omega$	135 mA	349 V

**TABLA I.** Cuadro de tensiones y corrientes necesarias para cada lente

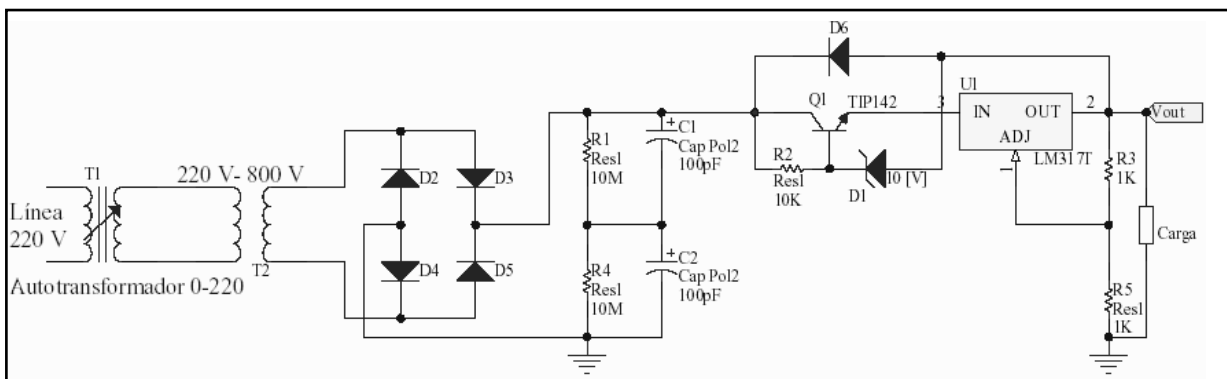
### II.3. Diseño de las fuentes de tensión para las fuentes de corriente

Para el diseño de estos circuitos las condiciones planteadas fueron: que las fuentes fueran simples, con buena regulación, estables, y –de ser posible– con un diseño único para todas las lentes; la solución final debía ser probada con cada lente y no debían apreciarse alteraciones en la imagen del microscopio atribuibles a mal funcionamiento de estas fuentes. Por otro lado, ya que estas fuentes se utilizan en conjunto con las fuentes de corriente, se consideró la posibilidad de que estuvieran construidas en una misma plaqueta.

Debido a que la lente objetiva es la que posee los mayores requerimientos de tensión y corriente (Tabla I), el diseño se realizó tomando ésta como punto de partida y luego se procedió a adaptarlo a cada una de las otras.

### II.4. Implementación en banco de las fuentes de tensión para cada lente

Para las pruebas en banco se usó el circuito de la Figura 4. Las tensiones alternas se obtuvieron a partir de un autotransformador variable del tipo VARIAC (T1 en Fig. 4) y un transformador posterior elevador de tensión (T2 en Fig. 4), con lo cual fue posible obtener fácilmente los rangos deseados de tensión y realizar un ajuste fino para cada una de las lentes.



**FIG. 4.** Implementación de la Fuente de Tensión

Se fueron aplicando distintos valores de carga hasta finalmente llegar a usar el devanado propio de cada lente como carga.

Se evaluó la regulación de los circuitos de las fuentes de tensión en tres situaciones: carga variable, tensión de entrada variable y estabilidad en el tiempo. Los instrumentos utilizados fueron los mismos que en la implementación de la fuente de corriente (multímetro Wavetek y Osciloscopio Tektronik), más un osciloscopio Thandar SC110, de Sinclair Electronics, con punta atenuadora ya que se manejaban tensiones del orden de los 500 V, y un multímetro digital Sanwa MD-180C de 3 1/2 dígitos para medir la tensión de entrada variable.

## II.5. Construcción de los conjuntos fuente de corriente – fuente de tensión

Quedaba por observar el funcionamiento en conjunto de las fuentes de corriente con sus respectivas fuentes de tensión y con la carga real del devanado correspondiente. Para esto se diseñó una nueva plaqueta que contuviera el conjunto, teniendo en cuenta las condiciones de disipación de potencia de determinados componentes como el transistor de potencia TIP142, el regulador de tensión LM317 y la resistencia elevadora de tensión (R5 en Fig. 4) en la fuente de tensión, y el MOSFET en la fuente de corriente.

Para el diseño de las placas de circuito impreso, en todos los casos se utilizó el software D-XP Protel 8.0.4.1272 (2004).

## II.6. Prueba en banco y sobre el Microscopio

Se procedió a probar en banco los conjuntos construidos, estableciendo manualmente diferentes niveles de corriente y midiendo nuevamente su estabilidad en el tiempo y su regulación ante variaciones en la entrada.

Aun cuando estas pruebas satisficieran las condiciones planteadas, no es posible determinar en banco si estas prestaciones resultan suficientes para obtener una buena imagen en el microscopio electrónico. Esto se debe, sobre todo, a que variaciones que alcanzan a afectar la imagen no siempre pueden ser medidas con los instrumentos con que se cuenta. Esta situación condujo a que la evaluación final del funcionamiento de los circuitos se debiera realizar conectando los mismos a las lentes del microscopio y observando que la imagen tenga la calidad requerida.

## III. Resultados

La fuente de corriente revisada se muestra en la Figura 2. En el circuito original se utilizaba el amplificador operacional CA3140 de Intersil con entrada MOSFET, de muy alta impedancia y baja corriente de entrada, el cual además puede operar con alimentación unipolar (Intersil, 2002). Este integrado se mantuvo en el diseño definitivo.

Para regular la corriente en la lente se necesita un transistor que pueda manejar una corriente de 200 mA o más, que soporte una tensión superior a 500 V y que sea capaz de disipar una potencia de 22 W como mínimo. El transistor utilizado originariamente era el MTP3N100E, un MOSFET de canal N con una  $I_{dmax} = 3$  A, y una  $V_{dsmax} = 1000$  V. Este FET fue reemplazado por el 2SK2671, debido a su disponibilidad en el mercado local; es también un MOSFET de canal N con una  $I_{dmax} = 5$  A, una  $V_{dsmax} = 900$  V y una disipación de potencia de hasta 40 W (Shindengen Electrics, 2000). El transistor BC548, conectado a la salida del amplificador operacional, se mantuvo. La resistencia que mide la corriente que circula por la lente era originalmente de 120  $\Omega$ . Este valor fue cambiado con el objeto de correlacionar los valores de corriente en la lente con los valores de tensión de entrada. Se adoptó para dicha resistencia un valor de 100  $\Omega$ . Las resistencias de 10 k $\Omega$  mantienen su valor.

La protección contra sobretensiones a la salida del amplificador operacional se realiza por medio de un diodo zener, adoptándose para el mismo un valor de  $V_z = 20$  V, calculado para la mayor de las entradas.

Los componentes citados son iguales para las fuentes de corriente de todas las lentes, con lo que se logra una uniformidad de diseño entre ellas. Esto se realizó así con el fin de facilitar las tareas de mantenimiento y minimizar los tiempos de reparación ante salidas de servicio.

Como la protección contra elevaciones abruptas de corriente debe ser diferente en cada lente, debido a que éstas operan con valores máximos distintos, el circuito que actúa como limitador (Fig. 3) se mantiene idéntico pero cambia el valor de la resistencia que mide la corriente ( $R_{lim}$  en Fig. 3).

Las corrientes que es necesario establecer en cada lente y la resistencia del devanado correspondiente determinan el valor de tensión con que se debe alimentar a cada una de las fuentes de corriente (Tabla I).

Las fuentes de tensión se basan en el circuito integrado regulador de tensión LM317 (STMicroelectronics, 1999) al que se agrega un preregulador, el transistor TIP142 (STMicroelectronics, 2000). La disposición del circuito se puede observar en la Figura 4, quitando la parte de alimentación de entrada usada sólo para las pruebas. El circuito es el mismo para todas las lentes; sólo cambian en cada fuente el valor de los capacitores de entrada (C en Tabla I) y la resistencia de ajuste de tensión (R en Tabla II).

Lente	C	R	$V_{in}$ (CA)	$V_a$ (CC)
Condensadora 1	100 $\mu$ F / 200 V	41,2 k $\Omega$	152 V	158 V
Condensadora 2	100 $\mu$ F / 350 V	66 k $\Omega$	229 V	253 V
Objetiva	100 $\mu$ F / 350 V	136 k $\Omega$	447 V	524 V
Intermedia	100 $\mu$ F / 350 V	78 k $\Omega$	265 V	300 V
Proyectora	100 $\mu$ F / 200 V	92 k $\Omega$	303 V	349 V

**TABLA II.** Cuadro de tensiones, capacidad de filtro y resistencia de ajuste de cada fuente de alimentación

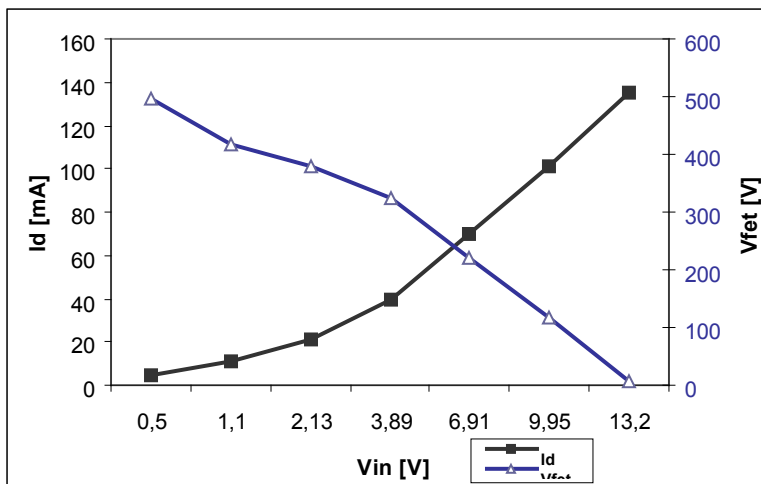
Una vez probadas las fuentes de corriente y tensión, se construyeron ambos circuitos en una sola placa para cada lente y se procedió a realizar las pruebas finales en banco. Estas pruebas se realizaron sobre el devanado de la lente objetiva debido a que es la que tiene los requerimientos de estabilidad y disipación de potencia más exigentes.

Con el microscopio en condiciones normales de operación, se colocó una muestra y se ajustaron los valores de corriente de las distintas lentes hasta obtener una imagen nítida de la misma. Se registró el valor de la corriente que estaba circulando por la lente objetiva. A continuación se reemplazó la alimentación original de la lente objetiva (proporcionada por las fuentes propias del microscopio) por el conjunto fuente de corriente – fuente de tensión diseñado y probado anteriormente. La corriente en la lente se hizo coincidir con el valor registrado previamente; para esto, el valor de ajuste a la entrada de la fuente de corriente se obtuvo por medio de un divisor resistivo.

Además de poder obtener una imagen nítida, en foco, es necesario que esas condiciones se mantengan al menos durante unos cuantos minutos, en el transcurso de los cuales un operador experto no debe apreciar variaciones en la imagen, aún cuando el microscopio no haya alcanzado plenamente la estabilidad térmica. Se dejó, entonces, el microscopio funcionando con el conjunto en prueba durante cuarenta y cinco minutos, en el transcurso de los cuales se corroboró que la imagen seguía manteniendo las mismas características de enfoque que al principio.

#### IV. Discusión

Desde un principio, la implementación de la fuente de corriente condujo a resultados satisfactorios, ya que en todos los casos se pudo establecer fácilmente el valor deseado de corriente, dentro del rango previsto para las lentes. La misma se mantuvo estable cuando se cambiaron los valores de tensión de alimentación dentro de 5% de su valor. Un análisis de la corriente proporcionada por la fuente frente a diferentes tensiones de ajuste a la entrada muestra un comportamiento relativamente lineal (Fig. 5). En cada punto de la curva no se apreciaron variaciones de la corriente durante al menos 10 minutos. También se pueden apreciar en la Fig. 5 las caídas de tensión en el transistor FET en cada punto de ajuste de la corriente.

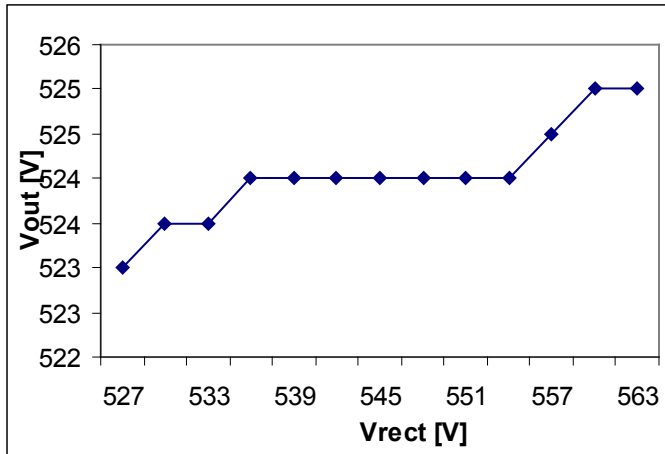


**Fig. 5.** Análisis de la fuente de corriente

Estas pruebas confirmaron el correcto funcionamiento del circuito, aunque nada aseguraba que este funcionamiento fuera adecuado con grandes cargas inductivas como son los devanados de las lentes electromagnéticas. Para eso, esta fuente de corriente debía ser probada finalmente con las cargas reales.

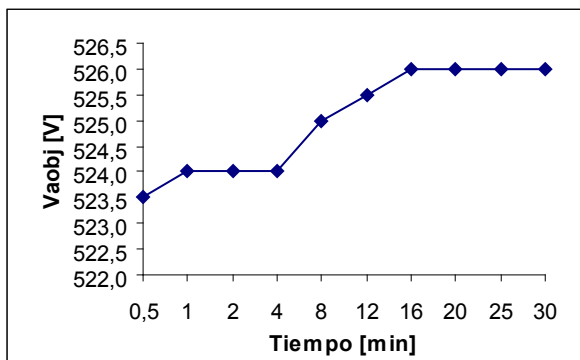
Con respecto a las fuentes de tensión, el circuito usado para las pruebas (Fig. 4) permitió optimizar el tiempo de implementación de las distintas configuraciones. El diseño de estas fuentes dio como resultado un circuito simple y de muy buenas prestaciones. En las pruebas se observaron características muy importantes cuando se las evaluó en lo que respecta a carga variable, tensión de entrada variable y estabilidad en el tiempo:

Las fuentes no mostraron variación de la tensión de salida ante variaciones de la carga. Las variaciones de la tensión de salida ante variaciones de la tensión de entrada pueden observarse en la Figura 6. La curva ha sido trazada en función de la tensión continua a la salida del rectificador. Se puede observar que, ante variaciones del 5% (30 V) en la tensión de entrada, sólo se percibe un aumento del 0,5% (3 V) a la salida de la fuente de tensión, lo que es aceptable para la aplicación deseada.



**FIG. 6.** Regulación de una fuente de alimentación en función de la tensión de entrada

La variación de la tensión de salida en el transcurso del tiempo se puede observar en la Fig. 7. Vemos aquí que durante los primeros minutos existe un incremento de la tensión que se acentúa entre los 4 y 16 minutos, a partir de los cuales se logra la estabilidad térmica de los componentes electrónicos utilizados en los circuitos. Esta respuesta se considera adecuada para el uso previsto.



**FIG. 7.** Estabilidad de una fuente de alimentación en función del tiempo

Con estas pruebas se lograron establecer los valores exactos para la construcción del transformador que proporciona la alimentación alterna para cada una de las fuentes. En este transformador también se prevé la posibilidad de realizar un ajuste fino de acuerdo a la tensión real de línea; para eso el devanado primario tiene entradas de 200, 210, 220, 230 y 240  $V_{CA}$ .

Finalmente, cuando se reemplazó la alimentación original de la lente objetiva, con el microscopio en funcionamiento, por los circuitos previamente diseñados y construidos, no se apreció diferencia en la formación de la imagen. Además, la calidad de la imagen se mantuvo al menos durante el lapso en que se realizaron las pruebas, considerado suficiente para efectuar su observación y registro. Teniendo en cuenta que la lente con la cual se ha hecho la experiencia es la que tiene exigencias más críticas, se puede asegurar que con este diseño todas las demás lentes tendrán un comportamiento igual o superior.



## V. Conclusiones

Los resultados en banco de las pruebas en conjunto de la fuente de alimentación y la fuente de corriente para cada lente ya permitían predecir un correcto funcionamiento cuando fueran instaladas en el microscopio.

Con la experiencia final sobre este último, se concluyó que las fuentes de alimentación de tensión y de corriente tienen la estabilidad necesaria para ser usadas en el microscopio, y que la calidad de la corriente que se establece en el devanado satisface las exigencias para una correcta formación de la imagen.

## Referencias bibliográficas

- HITACHI LTD. (1964) Instruction Manual for Type HC-11C-1 Hitachi Electron Microscope. Japan.
- INTERSIL. (2002) CA 3140-CA 3140A Datasheet. U.S.A.
- POLIFEME, CHRISTIANA.; TOLABA L. DAVID. (1998) Diseño del Sistema de Alimentación de las Lentes Electromagnéticas del Microscopio Hitachi HU-11C controlado por PC. Proyecto Final de la Carrera de Bioingeniería N° 97.
- POLIFEME, CHRISTIANA.; TOLABA, L. DAVID; BALDUCCI, FERNANDO D.; VILÁ, JOSÉ FÉLIX. (1998) Desarrollo de un Medidor de Magnificación para Microscopio Electrónico de Transmisión basado en PC, en: Memorias del 1er. Congreso Latinoamericano de Ingeniería Biomédica, pp 58-61. Mazatlán, México. (Disponible edición en CD)
- POLIFEME, CHRISTIAN; TOLABA, L. DAVID; BALDUCCI, FERNANDO D.; VILÁ, JOSÉ FÉLIX. (1999) Control por Computadora de las Lentes Electromagnéticas de un Microscopio Electrónico, en: Memorias del V Interamerican Electron Microscopy Congress. Isla de Margarita, Venezuela.
- SHINDENGEN ELECTRICS MFG.CO.LTD. (2000) 2SK2671 (F5F90HVX2) Datasheet. Germany.
- STMICROELECTRONICS. (1999) LM117/217-LM317 Datasheet. Italy.
- STMICROELECTRONICS. (2000) TIP 140 Datasheet. Italy.
- VILÁ, JOSÉ FÉLIX; BALDUCCI, FERNANDO. (2002). Medidor de Magnificación para Microscopio Electrónico de Transmisión basado en PC, en: *Ciencia, Docencia y Tecnología*, XIII (24), pp.183-202. Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina.