

Fuente de alimentación variable con ajuste digital, basada en el micro controlador ATmega2560

Juanse S. Domínguez ^{a*}, Edgardo A. Nerenberg ^a, Gustavo O. Rossler ^a, Guillermo A. Fernández ^{a,b}

^a Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Facultad de Ingeniería. Oberá, Misiones, Argentina.

^b Universidad Nacional de Misiones (UNaM)-CONICET. Facultad de Ingeniería. Instituto de Materiales de Misiones (IMAM). Grupo de Investigación y Desarrollo en Electrónica (GIDE). Misiones, Argentina

dominguezjuanssesantiago@gmail.com, arielnerenberg@gmail.com, gustavo.rossler@fio.unam.edu.ar, guillermo.fernandez@fio.unam.edu.ar

Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo de una fuente de alimentación regulada con tensión de salida variable. La misma opera mediante un microcontrolador que genera una señal modulada en ancho de pulso de 1kHz de frecuencia, para gobernar el voltaje de salida de un regulador de tensión comercial. El programa desarrollado para el microcontrolador puede modificar el ancho de pulso de la señal y así proporcionar la tensión de salida requerida en la fuente de alimentación. Este ajuste digital puede realizarse con la interfaz de usuario de la fuente que está conformada por cinco pulsadores, uno para cambiar la tensión de salida en pasos (5 V, 9 V, 12 V y 15 V), dos pulsadores para un ajuste grueso de la tensión (pasos de +/-1 V) y otros dos pulsadores para el ajuste fino de la misma (pasos de +/- 0,1 V). La fuente también posee un display para mostrar el voltaje de salida y otras variables. El desarrollo de este trabajo permitió integrar conocimientos, como así también posibilitó indagar en el diseño de sistemas embebidos, desarrollando capacidades como la toma de decisiones, planificación y gestión del tiempo. Los resultados obtenidos fueron concordantes con el diseño de la fuente, observándose que, mediante el programa desarrollado y la interfaz de usuario, el microcontrolador pudo controlar la tensión de salida de la fuente al valor deseado.

Palabras Clave – Ajuste digital, Filtro, Fuente de alimentación, Microcontroladores.

1. Introducción

La fuente de alimentación presentada en este trabajo fue realizada como trabajo integrador final de la asignatura Técnicas Digitales 2, correspondiente a la carrera Ingeniería Electrónica. La fue realizada con el fin de complementar y afianzar los saberes desarrollados en la asignatura, obteniéndose un prototipo que servirá para energizar circuitos de futuros proyectos.

Las fuentes de voltaje reguladas son equipos capaces de mantener constante un voltaje determinado en sus terminales de salida, independientemente de la carga conectada en la misma, para este caso el voltaje deseado se establece utilizando una interfaz de usuario a través de pulsadores manejados por un microcontrolador.

El trabajo realizado tiene como objetivo diseñar una fuente de voltaje con la capacidad de ser ajustada digitalmente, para ello es necesario realizar el diseño tanto del software, como el diseño del hardware con la utilización de las herramientas brindadas en el cursado de esta asignatura, como también asignaturas anteriores.

La fuente que se desea diseñar debe poseer la capacidad de ajustar el voltaje mediante pulsadores teniendo las funciones de aumentar y/o reducir el voltaje en los bornes de salida, pudiendo realizar este ajuste en saltos grandes (5V, 9V, 12V y 15V) o pequeños (+/-1 V, +/- 0.1 V), así como también tener la funcionalidad de visualizar el voltaje que posee el sistema en su salida mediante la medición correspondiente.

Para la solución del problema se plantea un sistema con seis etapas, las cuales son encendido/apagado de la fuente, el filtrado, la amplificación de tensiones, el sensado de salida, la regulación de tensión y el sistema de control. El microcontrolador se encarga de leer el estado de los pulsadores, mostrar en un *display* el voltaje de salida del sistema, así como generar una señal por la técnica de Modulación por Ancho de Pulso (PWM por sus siglas en inglés) de ciclo útil variable. Esta señal de PWM es filtrada y amplificada para utilizar el regulador de tensión LM338 y por consecuencia el valor de voltaje de salida.

2. Desarrollo

2.1. Operación del circuito propuesto

En la Fig.1, se presenta el diagrama de bloques del sistema. Como se puede apreciar en el diagrama, el microcontrolador se encarga de comandar todo el sistema, según las señales que reciba en la etapa de control (la cual es comandada por el usuario). El microcontrolador puede prender y apagar el sistema, así como también generar una señal del tipo PWM de ciclo útil variable que al ser filtrada se convertirá en una señal de corriente continua de un valor constante dependiente del ciclo útil de la señal PWM.

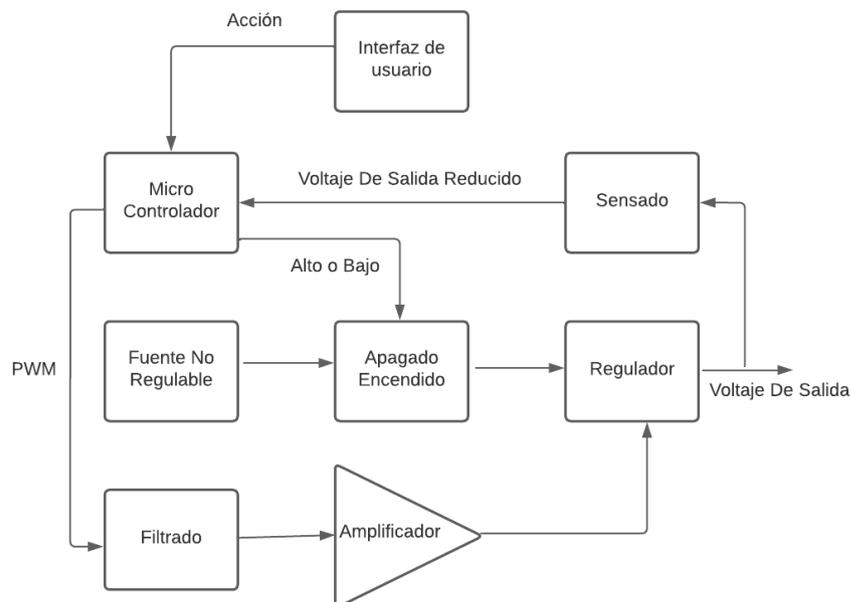


Fig. 1. Diagrama de bloques del circuito.

En el diagrama de la Fig. 1, la señal filtrada pasa por una etapa de amplificación que sirve para modificar la referencia de la etapa reguladora y de esta forma modificar el voltaje de salida. Este voltaje pasa por una etapa de sensado la cual se encarga de reducir el voltaje para poder ser procesado por el microcontrolador sin llegar a dañarlo.

2.2. Interfaz de Regulación y Operación

Esta primera parte es un conjunto de pulsadores (Fig. 2), los cuales sirven para realizar las acciones correspondientes a la regulación y el encendido/apagado del sistema. Dichos pulsadores poseen un resistor de pull-up, que los mantiene normalmente en alto, para este caso, 5 V. Cuando son pulsados, cambian el estado del pin a bajo, generando un flanco descendente, que es detectado por el microcontrolador.

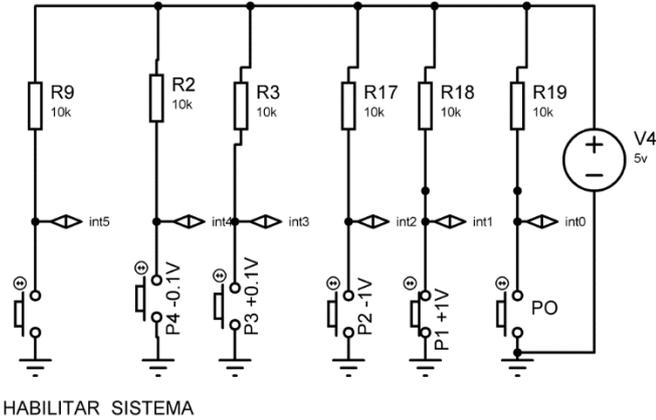


Fig. 2. Circuito de la interfaz de usuario (pulsadores).

Esta parte del circuito el cual permite habilitar o deshabilitar el sistema (Fig. 3), accionando la bobina del relevador RL1, mediante un estado alto o bajo en el transistor Q1. Este relé es comandado por un puerto del microcontrolador, el cual detecta el flanco descendente del pulsador de encendido/apagado.

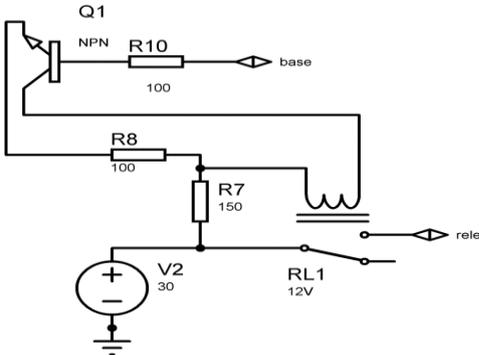


Fig. 3. Circuito de apagado/encendido.

2.3. Regulación y sensado

En la figura 4 tenemos el circuito que se encarga de regular el voltaje de salida del sistema en función del voltaje que ingrese por el pin ADJ de U2

Para la regulación de salida, se ha elegido un LM338, que son reguladores de voltaje positivo ajustables de 3 terminales. Estos dispositivos son capaces de suministrar más de 5 A corrientes de salida y un rango de tensión ajustable entre 1,25 V a 32 V.

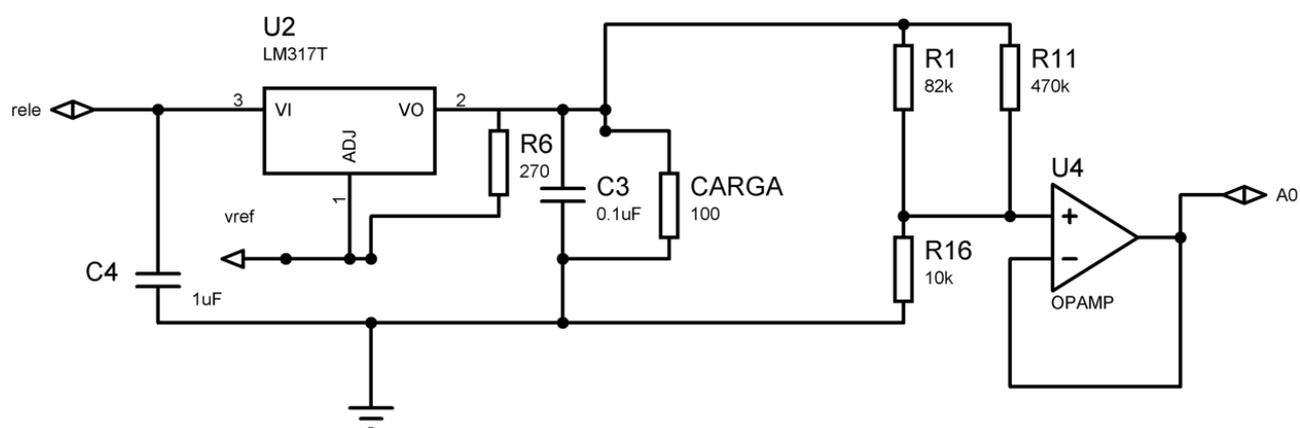


Fig. 4. Circuito de regulación y sensado del voltaje de salida de la fuente.

La etapa de sensado, fue construida por medio de un divisor resistivo conformado por R1//R11 y R16. De esta manera conseguimos una tensión menor que la presente en la salida, con valores que pueden ingresarse al Conversor Analógico Digital (ADC) del microcontrolador, la cual debe estar comprendida entre los 0 a 5V. Este valor de voltaje, se conecta a un Amplificador Operacional (AO) U4, en configuración seguidor de voltaje.

2.4. Filtro y Amplificación de la señal de PWM

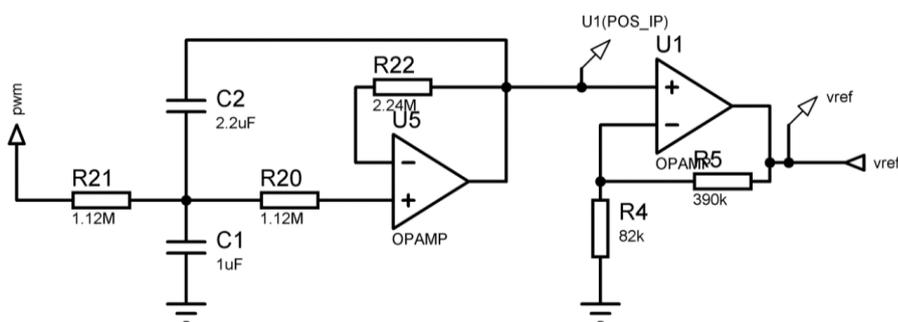


Fig. 5. Filtrado y amplificación de la señal PWM.

En la figura 5, tenemos el circuito de filtrado conformado por un filtro activo comandado por un U5, que es un AO, encargado de filtrar la señal PWM proveniente del microcontrolador. Esta etapa es muy importante, ya que en el terminal de ajuste ADJ del LM338, debemos tener una tensión analógica, y si pusiéramos una tensión variable, la salida del mismo copiaría estas variaciones presentes en el terminal ADJ.

El AO, denominado U1, es un circuito amplificador de tensión, el cual se encuentra en configuración de amplificador no inversor teniendo este una ganancia de 5.756 aproximadamente. Esta ganancia la generamos para poder regular el terminal ADJ en valores mayores a 5 V, que es la máxima salida del microcontrolador.

2.5 Calculo de componentes del circuito

2.5.1 Diseño del filtro Butterworth pasa bajos

El circuito del filtro en forma general, junto a su respuesta frecuencia que se muestran a continuación:

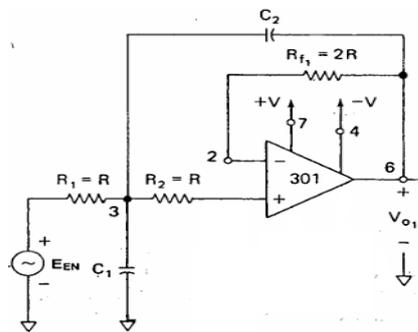


Fig. 6. Esquema general del filtro [7]

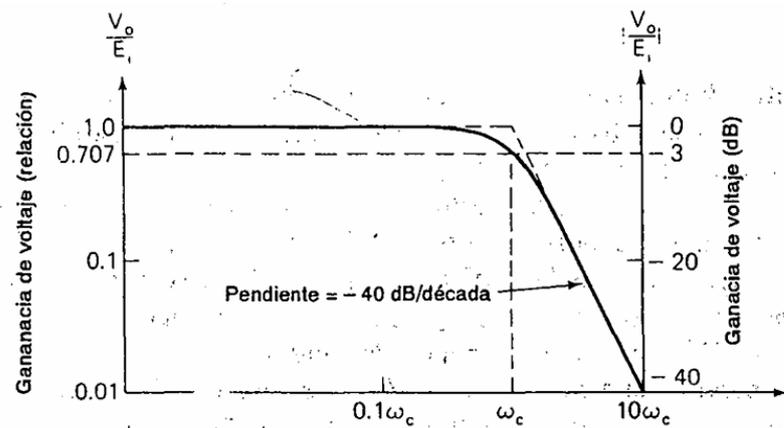


Fig. 7. Respuesta en frecuencia del filtro [7]

Se inicia con el diseño del filtro Butterworth pasa bajos, utilizando el método simplificado [7] el cual consiste en el siguiente algoritmo:

- Se debe seleccionar una frecuencia de corte, en este caso $15 \times 2\pi$ rad/s, como factor de seguridad ya que se están utilizando componentes de alta tolerancia y con ello nos evitamos perdida de inserción en las frecuencias menores a 3 Hz.
- Se escoge un capacitor entre 100 pF y 10 uF, para este caso se seleccionó 1 uF.
- Se hace que el otro capacitor sea igual al doble del primero seleccionado, en este caso al no tener un capacitor de 2 uF comercial, se utiliza uno de 2,2 uF.
- Se calcula el resistor utilizando la siguiente relación: $R = 0,707 / (2\pi fC)$
- Y finalmente el resistor de realimentación tiene un valor igual al doble de los resistores en las entradas [7].

Quedando los resistores $R_{21} = 1,12 \text{ M}\Omega$; $R_{20} = 1,12 \text{ M}\Omega$; $C_1 = 1 \text{ uF}$; $C_2 = 2,2 \text{ uF}$ y $R_{22} = 2,2 \text{ M}\Omega$.

2.5.2 Diseño de la etapa amplificadora

Luego tendremos la etapa de amplificación en donde buscaremos una ganancia de 5,75 para que de esta forma lleguemos a la máxima salida teórica del regulador según su hoja de datos del regulador [6], la cual se da con una referencia de 28,75V y un voltaje de entrada de 30V. Considerando la relación de entrada y salida el amplificador operacional no inversor:

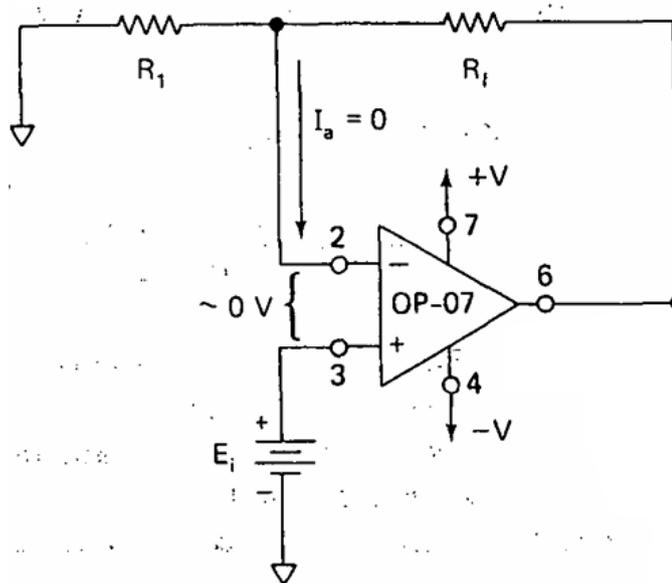


Fig. 8. Esquema general de un amplificador no inversor [7].

$$V_s = V_e \left(1 + \frac{R_f}{R_G} \right) \quad (1)$$

Se consigue el valor de $R5 = 390 \Omega$ y $R4 = 82 k\Omega$.

2.5.3 Diseño del divisor resistivo de la etapa de sensado

Se presenta la ecuación utilizada para los divisores resistivos utilizados en los esquemas de las figuras 3 y 4, donde R_{bottom} se refiere al resistor conectado a tierra y R_{top} al resistor conectado al voltaje:

$$V_S = V_e * \frac{R_{bottom}}{R_{bottom} + R_{top}} \quad (2)$$

Para el divisor resistivo utilizado para comandar el relé se tiene un voltaje de entrada de 30V y se busca una salida de 12 V, quedando los resistores $R7 = 150 \Omega$ y $R8 = 100 \Omega$, se seleccionaron estos valores bajos para poder cumplir con los requerimientos de corriente de la bobina del relevador.

En el divisor resistivo perteneciente al circuito de sensado se buscó reducir el voltaje máximo de salida en un factor de 7 quedando el resistor R1 con un valor de $70 k\Omega = (470 k\Omega // 82 k\Omega)$ y el valor de $R16 = 10 k\Omega$ siendo este resistor reemplazado por un *preset* de $20 k\Omega$ por si se requiere realizar ajustes de manera analógica [7].

2.5.4 Diseño del circuito del relé

Para finalizar se exponen los cálculos para todo el circuito del relé [3], [5],[8] :

$$I_C = \frac{P_{rele}}{V_{CC} - V_{rele} - V_{ce}} = \frac{360mW}{12V - 1,2V - 0,3V} = 3,8mA \quad (3)$$

$$I_b = \left(\frac{I_c}{hfe_{MIN}} \right) * 10 = \frac{34,28mA}{90} * 10 = 3,8mA \quad (4)$$

$$R_B = \frac{V_h - V_{BE}}{I_B} = \frac{4,2V - 0,7V}{3,8mA} = 921 \Omega ==> 1 k\Omega \quad (5)$$

3. Software

En esta sección se presenta el funcionamiento del programa, el cual fue desarrollado en lenguaje C utilizando el IDE de Micho Chip Studio, el programa fue basado en el uso de las interrupciones externas al microcontrolador ATmega2560 [2] a través del accionamiento de los pulsadores, teniendo tres tipos que se podrían diferenciar.

- La primera modifica el valor del ciclo útil de la señal en valores predeterminados, igualando el registro OCR1B a valores ya establecidos.
- El segundo tipo suma o resta valores fijos al registro OCR1B.
- Y la última interrupción simplemente pone en estado alto o bajo el puerto el pin 36 del Arduino para de esta manera accionar o apagar el relé.

A continuación, se presentan los diagramas de flujo correspondientes, así como una breve explicación de los mismos.

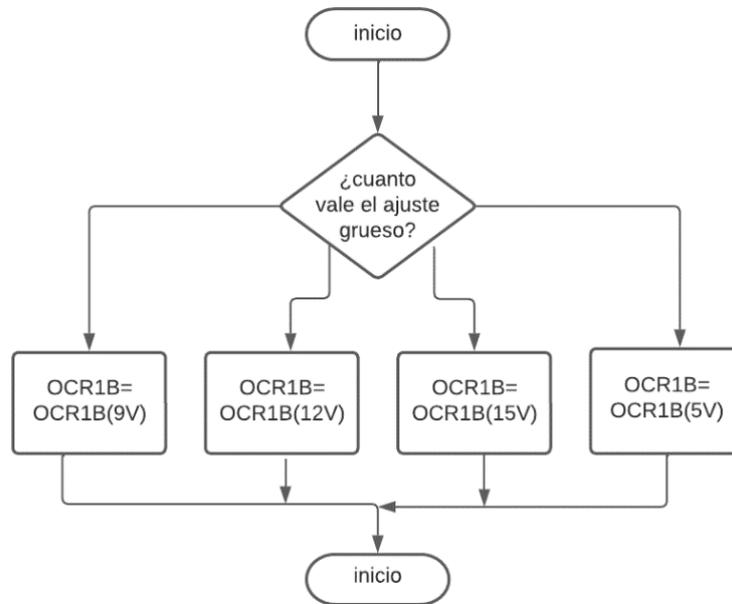


Fig. 9 Rutina de servicio a la interrupción externa INT0.

La rutina al servicio a la interrupción se corresponde con el pulsador 0 modificando los valores de voltaje a valores ya pre establecidos dentro de la problemática.

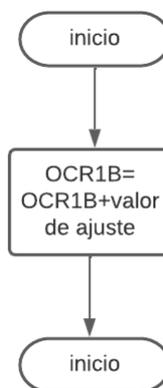


Fig. 10. Rutina de servicio a la interrupción externa INT1 a INT4

Este diagrama de flujo se corresponde con la rutina del servicio a la interrupción correspondiente con los pulsadores del 1 al 4 sumando o restando un valor fijo al registro OCR1B segundo corresponda pudiendo variar el voltaje en la salida en $\pm 1\text{ V}$ ó $\pm 0,1\text{ V}$.

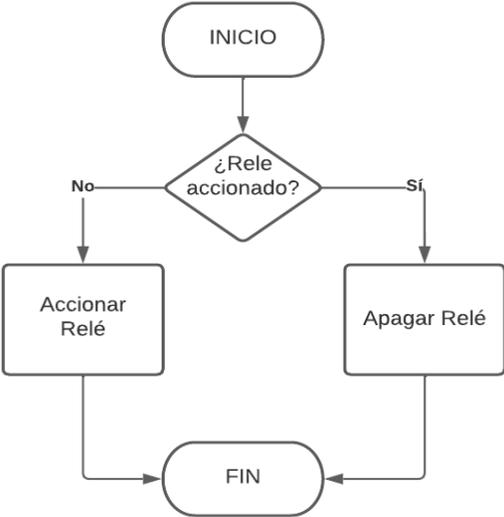


Fig. 11. Rutina de servicio a la interrupción externa INT5.

Esta ISR se corresponde con la última modificación realizada sobre el circuito la cual habilita o deshabilita el funcionamiento del Sistema.

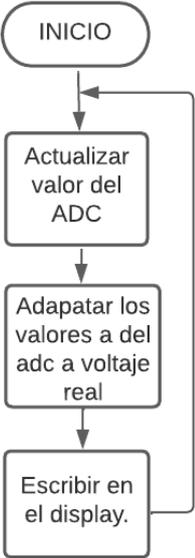


Fig. 12 Función principal.

Por último, este diagrama de flujo se corresponde con la función principal del programa, la cual realiza el sensado y acondicionamiento virtual del ADC para poder reflejar el valor real de voltaje presente en la salida del sistema a través de un display.

Para generar la señal PWM se utilizó el TIMER1 en modo fast PWM, con el objetivo que la señal generada tenga una frecuencia de 500 Hz.

$$OCR1A = \frac{T_{pwm}}{(N * T_{xtal})} - 1 \quad (6)$$

$$OCR1A = \frac{1}{8 \left(\frac{1}{16MHz} \right)} - 1 = 3999$$

el valor del registro OCR1B va a manejar el ciclo útil de la señal PWM

$$OCR1B = D * OCR1A \quad (7)$$

donde D puede tomar valores entre 0 y 1 siendo 1 el valor para un ciclo útil del 100% [2]-[9]

4. Resultados

Los ensayos fueron realizados tanto con simulación utilizando el software Proteus para las pruebas del sistema en general y el software PSIM para los ensayos de tiempo de respuesta del filtro, y los ensayos con el circuito fueron realizados en el laboratorio planta alta de la Facultad.

Siendo prácticamente idénticos los ensayos físicos y de simulación, lo más interesante fue la obtención de la relación entre el valor del registro OCR1B (ciclo útil de la señal PWM) y el voltaje en la salida del sistema viene dado por la siguiente ecuación:

$$V_o = 0,00719V * OCR1B + 1,2733V \quad (8)$$



Fig. 13. Circuito de control.

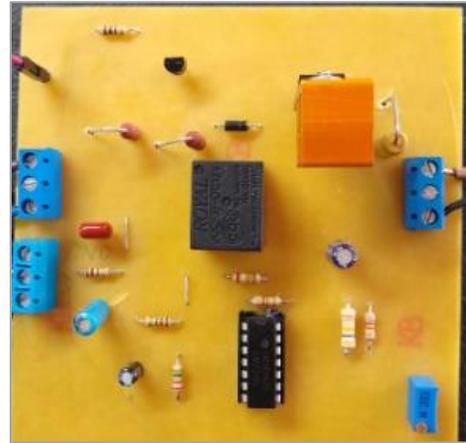


Fig. 14. Fuente de voltaje con ajuste digital.



Fig. 15. Prueba de funcionamiento.

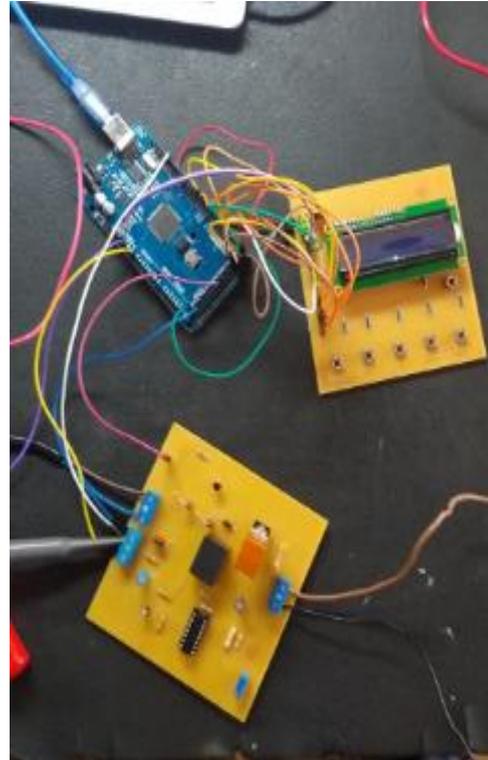


Fig. 16. Conexionado entre las distintas partes del circuito.

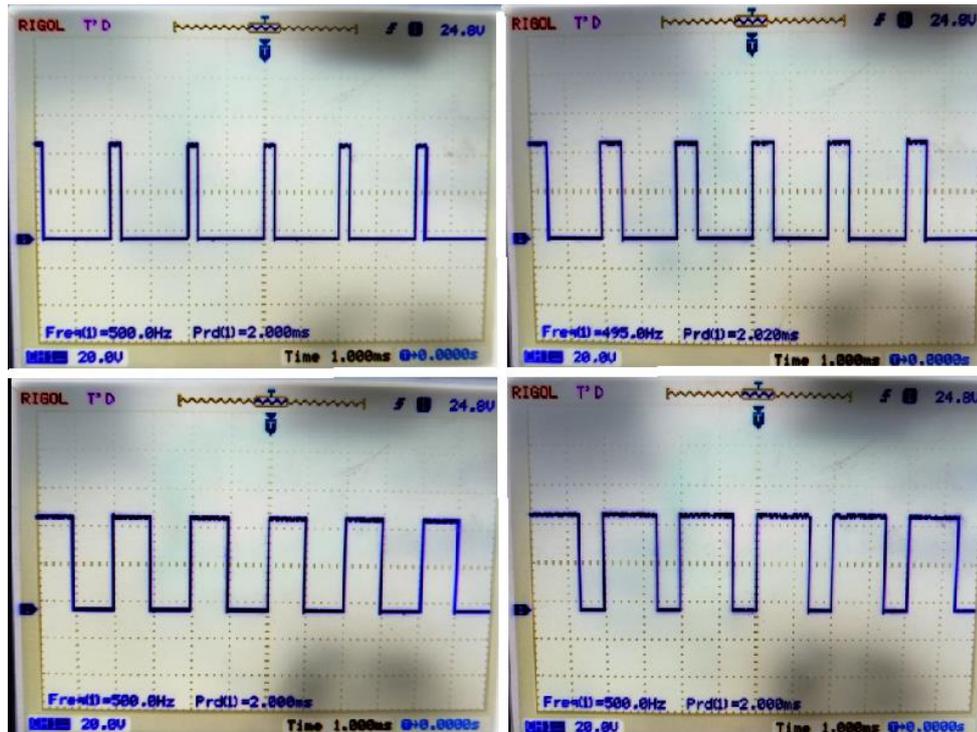


Fig. 17. Diferentes señales PWM proporcionadas por el microcontrolador ante cambios en el voltaje de salida de la fuente.

5. Conclusiones

Esta actividad experimental nos permitió desarrollar satisfactoriamente el sistema embebido solicitado, pudiendo cumplirse con los objetivos de realizar una fuente de alimentación variable con comandos digital, controlada por un microcontrolador.

Para poder desarrollar la misma, fueron necesarios los conocimientos de materias previas como Dispositivos Electrónicos, Análisis de Circuitos, Electrónica Analógica, Técnica Digitales 1, etc, como así también todos los temas abordados en la asignatura Técnicas Digitales 2, pudiendo observar la transversalidad para llevar a buen puerto la actividad.

Los sistemas embebidos son cada vez más utilizados en la industrias y sistemas de control automático, por su versatilidad y flexibilidad que pudimos observar al hacer ajustes de desempeño por medio de software.

Se logró poner en práctica y ver la gran utilidad que poseen los microcontroladores por medio de los convertidores analógicos digitales y los generadores del tipo PWM, siendo estas herramientas de mucha utilidad a la hora de resolver problemas del tipo práctico de la vida real. Los conocimientos adquiridos al desarrollar esta actividad, como también la integración de conocimiento general de electrónica han sido muy satisfactorios para los integrantes de este grupo de estudio.

Anexo 1: Circuito completo

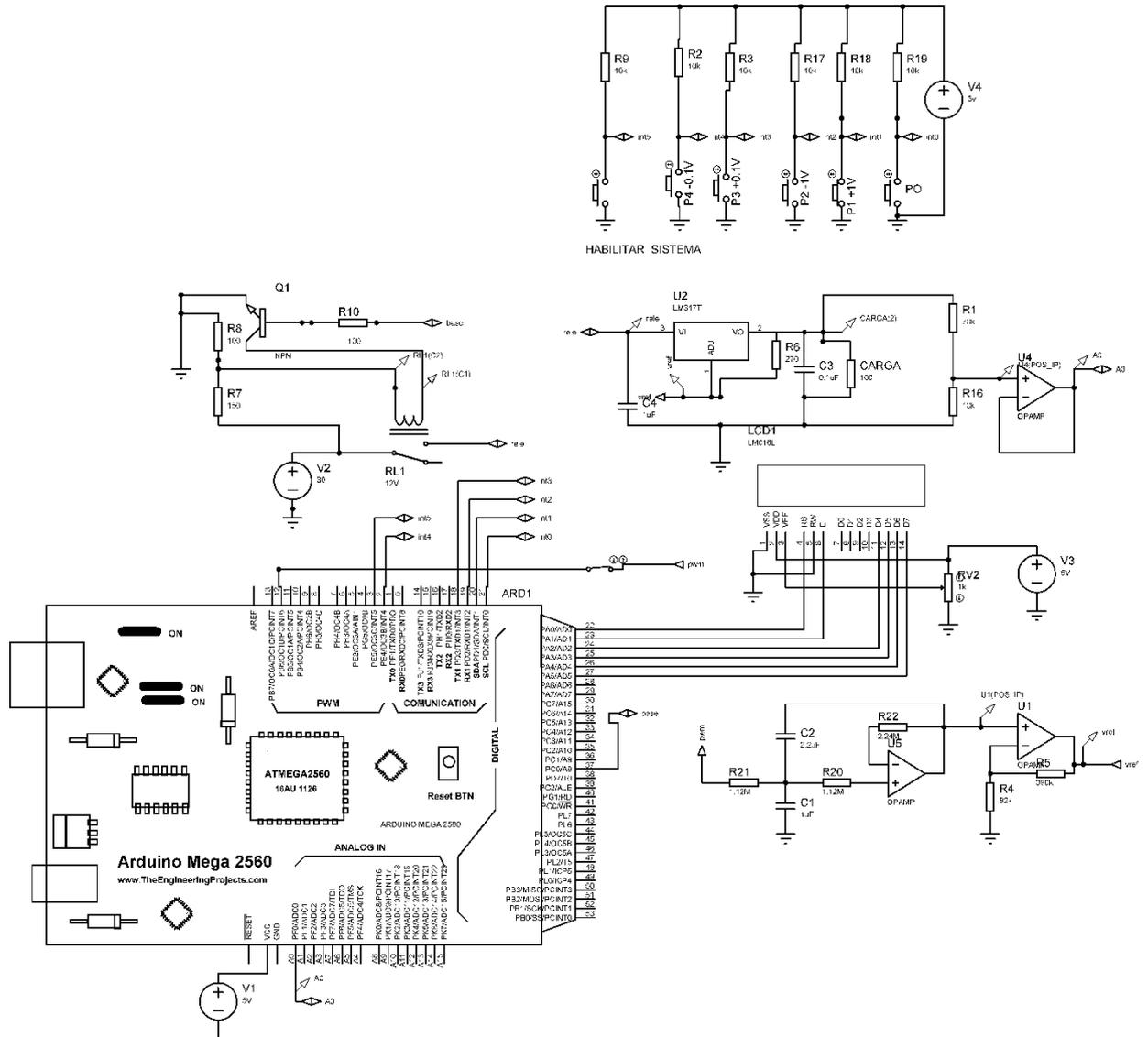


Fig. 14. Circuito de la fuente de alimentación variable con ajuste digital.

Anexo 2: Componentes utilizados

Tabla 1 - Componentes empleados en la confección del circuito

REFERENCIA	CANTIDAD	OBSERVACIONES
LCD	1	Display LCD 1602
P0, P1, P2, P3, P4, P5	6	Pulsadores
R9, R2, R3, R17, R18, R10, R16	6	Resistor 1 k Ω
R21, R22	2	Resistor 1,2 M Ω
Q1	2	Transistor BC548
RELE 1	2	Relé 12V JQC-3FF-003-1H
C1, C3	1	Capacitor 1 uF
C2	1	Capacitor 1uF 2,2 uF
C4	1	Capacitor de 0,1uF
D1	1	Diodo 1n4007
U1	1	Amp. Op. LM324
U2	1	LM338
R22	1	Resistor 2,2 M Ω
R4	2	Resistor 82 k Ω
R5	R5	Resistor 390 k Ω

Referencias

- [1] Apuntes de la asignatura Técnicas Digitales 2, Universidad Nacional de Misiones, Facultad de Ingeniería. Oberá, Misiones. 2022.
- [2] Atmel. ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V. Hoja de datos disponible on-line: https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-2549-8-bit-avr-microcontroller-atmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf
- [3] HONGMEI RELAY, Modelo JCQ-3FF. Relé con bobina de 12V y corriente máxima de 10 A. Hoja de datos disponible on-line: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/237112/ETC2/JQC-3FF-003-1H.html>
- [4] Amplificador Operacional LM324. Cuádruple AO. Alimentación simple 3 a 32 V. Hoja de datos disponible on-line: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1454698/ONSEMI/LM324.html>
- [5] Transistor BJT NPN BC548. Hoja de datos disponible on-line: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/11552/ONSEMI/BC548.html>
- [6] Regulador de voltaje lineal LM338, Hoja de datos disponible on-line : <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm138.pdf?ts=1691637772979>
- [7] Operational Amplifiers and Linear Integrated Circuits fourth edition, Robert F. Coughlin and Frederick F. Driscoll, Editorial Prentice-Hall, 1993.
- [8] Floyd, Thomas L. Dispositivos Electrónicos. 8a . ed. Mexico: PEARSON EDUCACION, 2008.
- [9] Floyd, Thomas L, Fundamentos de los Sistemas Digitales, 9ª ed ed. Madrid: PEARSON EDUCACION, 2006.