

Fuente de Corriente Continua: Digitalización de Control Analógico para Fuente de Alimentación Ajustable

Korpys Ernesto Andrés*^a, Krindges Fernando Natanael ^a, Botterón Fernando^(a,b), Maxit Alejandro ^a

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

^b GID-IE, FI-UNaM, Oberá, Misiones, Argentina.

e-mails: ernesto.korpys@gmail.com, krindgesfer@gmail.com, botteron@gmail.com, alejandro.maxit@fio.unam.edu.com

Resumen

El proyecto se centra en la modernización de una fuente de alimentación existente, en su mayoría analógica, de una tensión variable desde 0V hasta 30V y una corriente ajustable desde 0A hasta 3A, mediante la implementación de un control digital para la regulación precisa de la tensión y corriente de salida, empleando un lazo de corriente interno y un lazo de tensión externo para garantizar la estabilidad de la salida en diversas condiciones de carga. La esencia de este proyecto radica en la utilización de un microcontrolador para configurar los parámetros de salida de la fuente de alimentación, a través de un teclado. Este enfoque proporciona al usuario la capacidad de configurar fácilmente los valores deseados de tensión y corriente de salida, además del modo de operación, mientras que un display integrado ofrece una retroalimentación visual en tiempo real, mostrando tanto los valores establecidos como los valores reales de salida.

Palabras Clave – Control PID, Digitalización, Algoritmos de control, Aislación Galvánica, I2C.

1 Introducción

Las fuentes de alimentación proporcionan energía estable a partir de la red eléctrica. Este informe se centra en el diseño y modernización de una fuente de alimentación lineal existente, en su mayoría analógica, donde se resaltan sus componentes básicos y que función cumplen.

Primero, se presentan los elementos típicos de estas fuentes: transformador, rectificador, filtro, regulador y carga. Luego, se describe la fuente diseñada, que incluye innovaciones como aislamiento galvánico entre la sección de potencia y la digital, además de implementar una interfaz usuario-máquina intuitiva.

El estudio aborda tanto los circuitos de potencia, donde se utilizan transistores BJTs para la regulación, como el control digital mediante un microcontrolador Arduino Nano. Finalmente, se detallan los ensayos experimentales, observaciones y mejoras propuestas para futuras versiones.

Este informe ofrece una visión completa del desarrollo de una fuente de alimentación lineal, destacando su importancia y aplicaciones en electrónica moderna.

1.1 Presentación de las fuentes de alimentación.

Las fuentes de alimentación lineales son un elemento fundamental en la mayoría de los dispositivos electrónicos que utilizamos en nuestra vida cotidiana. Estas fuentes proporcionan la energía necesaria para alimentar circuitos electrónicos, convirtiendo la energía de la red eléctrica en una forma utilizable y estable para los componentes electrónicos. En esta sección, explicaremos los

elementos básicos que componen las fuentes de alimentación lineales pasivas y su funcionamiento fundamental para, más adelante, profundizar sobre la fuente que concierne a este artículo.

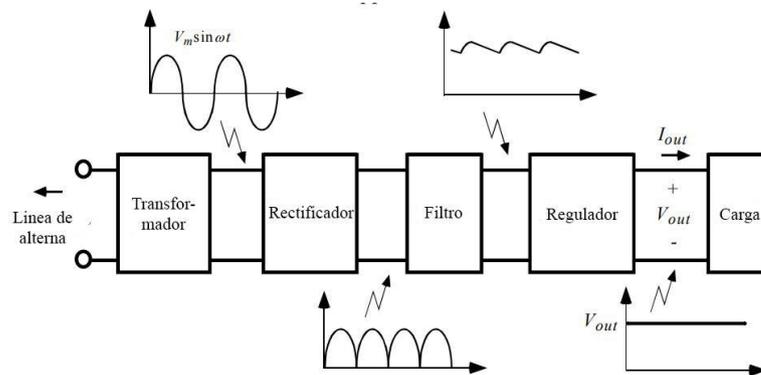


Fig. 1. Esquema de una fuente de alimentación general.

1.2 Secciones de componentes típicos.

Transformador: Puede aumentar o reducir el voltaje de entrada a un nivel adecuado para la siguiente etapa del proceso. En el caso de la fuente diseñada, el transformador primario reduce la tensión de 220V a 33V eficaces.

Rectificador: Convierte la corriente alterna (CA) del transformador en corriente continua (CC). Utiliza diodos para permitir el paso de la corriente en una sola dirección, eliminando la alternancia.

Filtro: Elimina las ondulaciones o rizos presentes en la señal de corriente continua rectificada. Generalmente, emplea capacitores y a veces inductores para suavizar la señal, proporcionando una tensión de CC más estable.

Regulador: Mantiene un voltaje de salida constante y preciso, a pesar de las variaciones en la carga o en el voltaje de entrada. Asegura que los dispositivos conectados reciban una alimentación estable.

Carga: Puede ser cualquier aparato electrónico que requiera una fuente de alimentación estable.

1.3 La fuente diseñada.

La fuente diseñada comparte varios elementos con el modelo anterior, aunque presenta diferencias significativas en la disposición y funcionalidad. Entre estas diferencias se encuentran secciones específicas dedicadas al control y registro de las magnitudes de salida, así como un actuador encargado de limitar dichas magnitudes. Además, se ha asignado una gran parte del diseño a la interfaz usuario-máquina, permitiendo así modificar la operación del dispositivo de manera intuitiva y eficiente.

Una característica distintiva de esta fuente es la implementación de aislamiento galvánico entre las secciones de potencia y las digitales. Esta medida se adoptó para asegurar la protección e independencia de cada sección, lo cual es fundamental para la integridad y seguridad del sistema. El aislamiento galvánico se refleja en la incorporación de múltiples transformadores y en la separación clara de las distintas secciones del circuito.

En la figura 2 se puede ver un diagrama de bloques que simplifica las diferentes secciones de la fuente. Está principalmente dividida en dos secciones una destinada a la zona de “potencia” donde las tensiones y corrientes manejadas son mayores. Y otra de control digital, donde se trabaja con tensiones menores que corresponde a señales controladas y comunicación entre componentes. La zona de potencia está diseñada para soportar y regular altas cargas, asegurando un suministro estable y confiable de energía. Por otro lado, la sección de control digital se encarga de supervisar y ajustar las operaciones del sistema, garantizando precisión y eficiencia en el funcionamiento de la fuente.

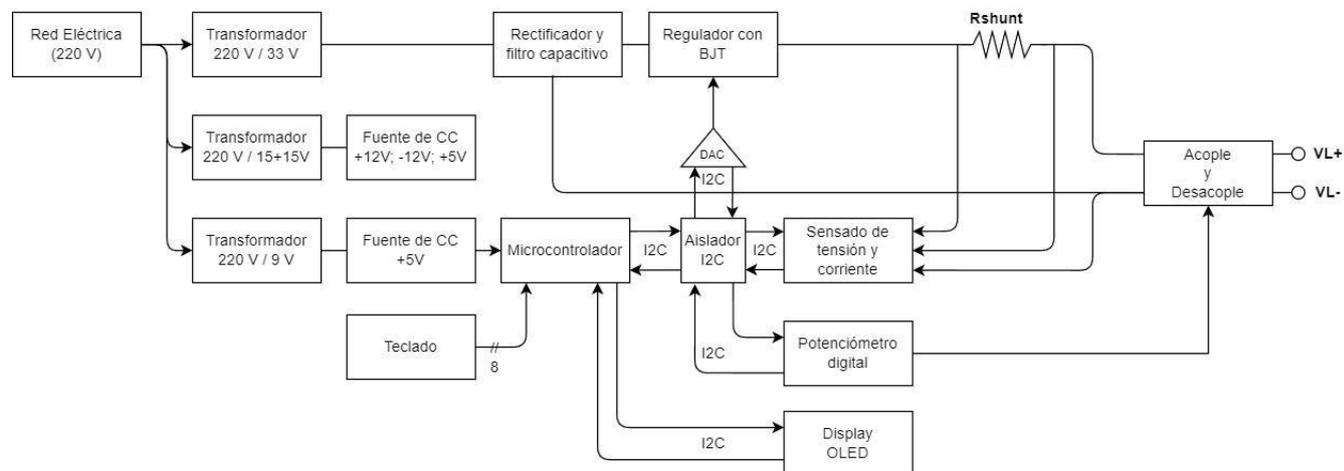


Fig. 2. Diagrama de bloques de fuente DC.

1.4 Circuito de potencia.

Circuito Actuador. Una de las partes de mayor interés del diseño es la sección de regulador lineal realizado mediante transistores BJTs. El mismo puede observarse en la Figura 3. Esta sección es responsable de, a partir de una tensión de control inyectada en la base de uno de los transistores, regular la excitación del mismo. Esta regulación permite la circulación de energía hacia la base de los transistores de potencia, que son los encargados de manejar las magnitudes de tensión y corriente aplicadas sobre la carga. Este mecanismo asegura un control preciso y eficiente de la entrega de potencia, optimizando el rendimiento del sistema y garantizando la seguridad operativa.

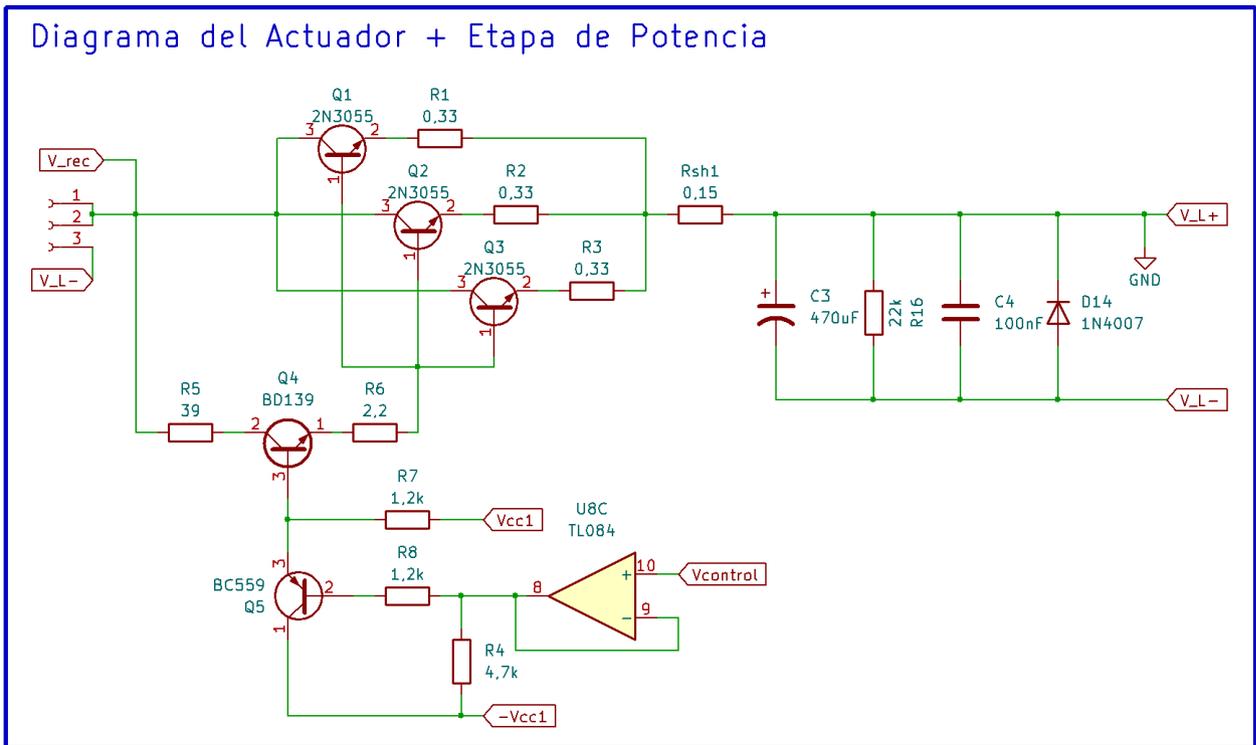


Fig. 3. Esquemático del circuito de regulación lineal mediante BJT.

Circuito sensor de Tensión y corriente. El circuito sensor de tensión y corriente está diseñado para acondicionar las magnitudes de las tensiones y corrientes presentes en la carga en tensiones equivalentes calibradas dentro de un rango específico (aproximadamente 0-5V). Esta conversión es crucial para que, mediante un convertidor analógico-digital (ADC), se puedan registrar estos valores y realizar las operaciones específicas necesarias, asegurando que el dispositivo opere dentro de los parámetros seguros y eficientes.

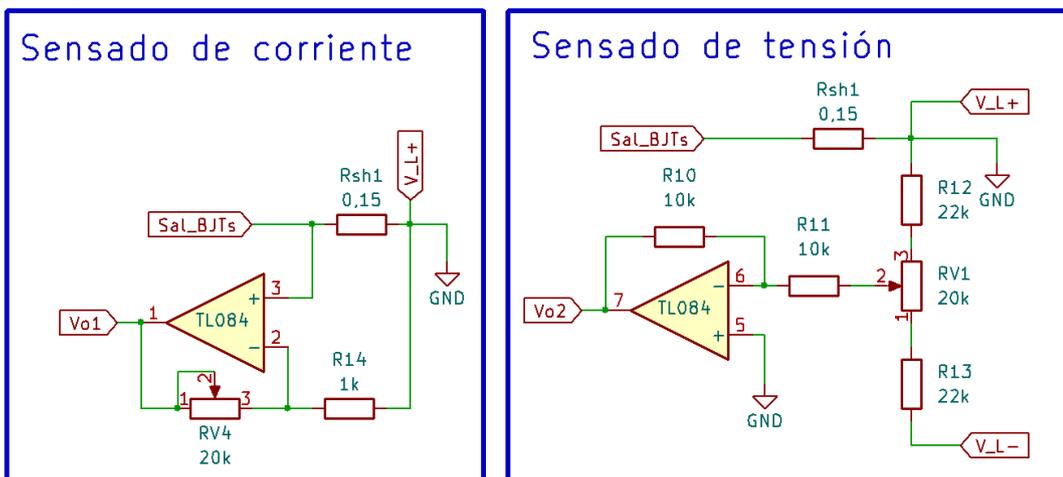


Fig. 4. Circuito de acondicionamiento de las magnitudes de salida.

Alimentación de los componentes. Para la operación normal de la placa se requieren diferentes niveles de tensión, siendo $+12V$ y $+5V$, obteniendo estos a través de reguladores lineales de la serie 78XX y 79XX. Aunque su función no implica una complejidad operativa elevada, estos circuitos son esenciales para proporcionar niveles de tensión estables a diversos componentes, permitiendo su encendido y correcto funcionamiento.

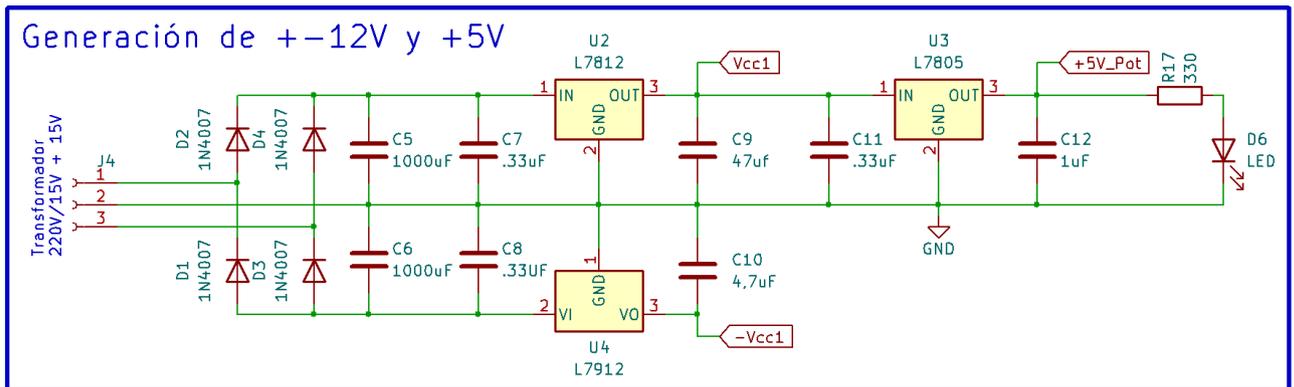


Fig. 5. Esquemático de uno de los reguladores de tensión.

Sección de control digital. Compuesta por un microcontrolador, el objetivo de esta sección es el de en base a los valores seteados y registrados a la salida, excitar acordemente la base de unos transistores para así permitir la circulación de tensión corriente controlada sobre la carga. Entre otras cosas como mostrar información en display, funcionar como protección y vincular/desvincular la carga. En la siguiente sección se entrará a detalle sobre el mismo.

2 Control digital.

2.1 Algoritmo y estrategia de control.

Como se mencionó en la introducción del artículo, este trabajo es respecto a la modernización de una fuente cuya naturaleza principal era en su gran mayoría analógica. Aquí se mencionan las diferencias principales en tanto en componentes como en funcionalidad de la misma.

Para la etapa digital se propone el diagrama de bloques de la figura 6. Se pretende controlar la tensión y corriente de salida mediante el ajuste de las referencias con un teclado numérico, de tal manera que mediante comunicación serie I2C podamos enviar los datos que proporcionan la referencia de tensión y corriente para el lazo de control.

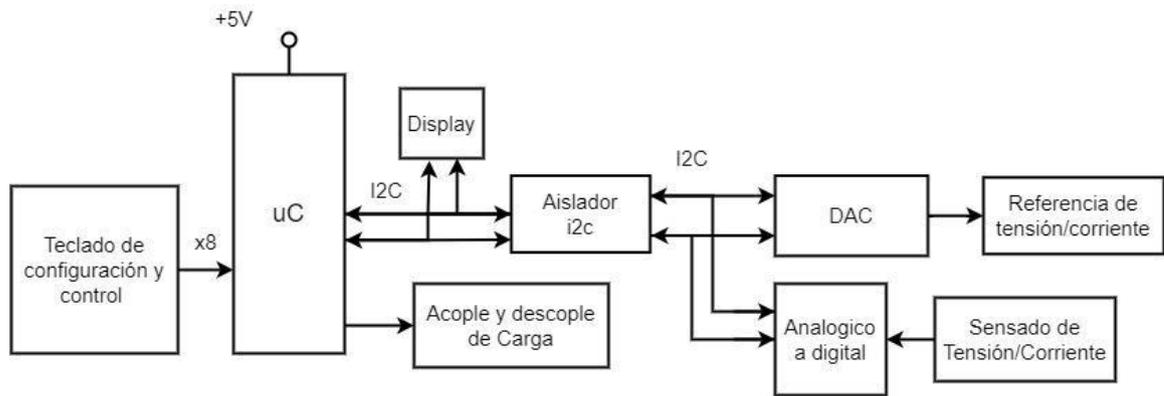


Fig. 6. Diagrama de bloques de la sección digital de la fuente DC.

2.2 Modificaciones y modernización digital.

Microcontrolador. Arduino Nano.

El componente a nombrar por sobre los demás es el microcontrolador Arduino Nano, dado que el mismo será el corazón de la operación de la fuente además del vínculo que unirá el resto de los componentes entre sí.

La razón por la que se eligió esta tecnología por sobre las demás se debe a su gran accesibilidad en el mercado además de sus especificaciones, resaltando especialmente la gran cantidad de pines, los diferentes protocolos de comunicación que maneja y a la gran comunidad de desarrolladores que tiene la tecnología Arduino. Se menciona esto ya que de no ser por ella, se complicaría finalizar el proyecto de la fuente de tensión en el plazo determinado. Gracias a la IDE y el gestor de librerías que facilita Arduino una gran cantidad de trabajo de programación, que requeriría meses de investigación, fue reducido significativamente.

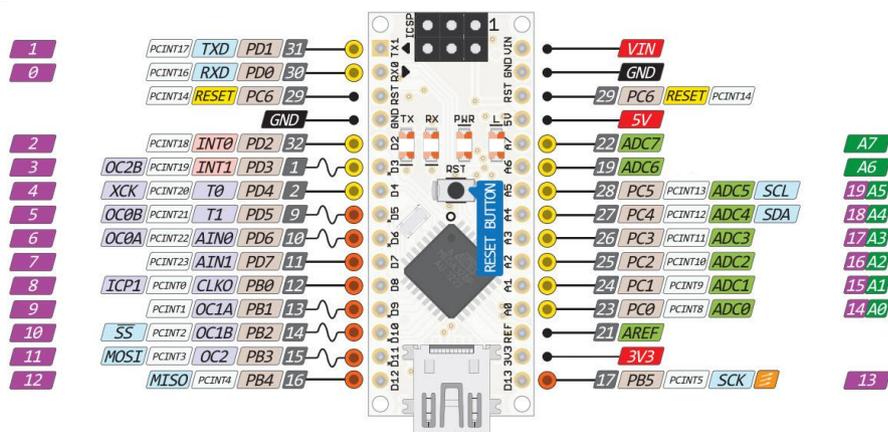


Fig. 7. Arduino Nano Pinout.

Se eligió el protocolo I2C de comunicación ya que es el formato más popular entre los distintos módulos disponibles en el mercado. El propósito de estos es permitir al microcontrolador tener acceso a las magnitudes de salida de la fuente, mientras que a su vez se le brinda posibilidad de interactuar con los reguladores lineales. Internamente, el microcontrolador estará ejecutando un algoritmo de control con el fin de regular los valores de la salida. Otra ventaja de utilizar el protocolo I2C radica en la posibilidad de conectar todos los elementos al mismo bus y acceder individualmente a cada uno mediante su dirección particular, de esta forma, requiriendo tan solo aislar los dos cables de datos de ambas secciones como se observa en la Figura 8. Los elementos más significativos de esta sección de procesamiento digital son:

- Teclado 4x4. Interacción y seteo de valores de la fuente.
- Display OLED SSD1306. Enseñar datos relevantes para el usuario.
- Aislador I2C capacitivo. Aislar galvánicamente la comunicación de I2C.
- ADC ADS1115. Sensor los valores de tensión a la salida de la fuente.
- DAC Mcp4725. Adaptar la acción de control a la base de los transistores.

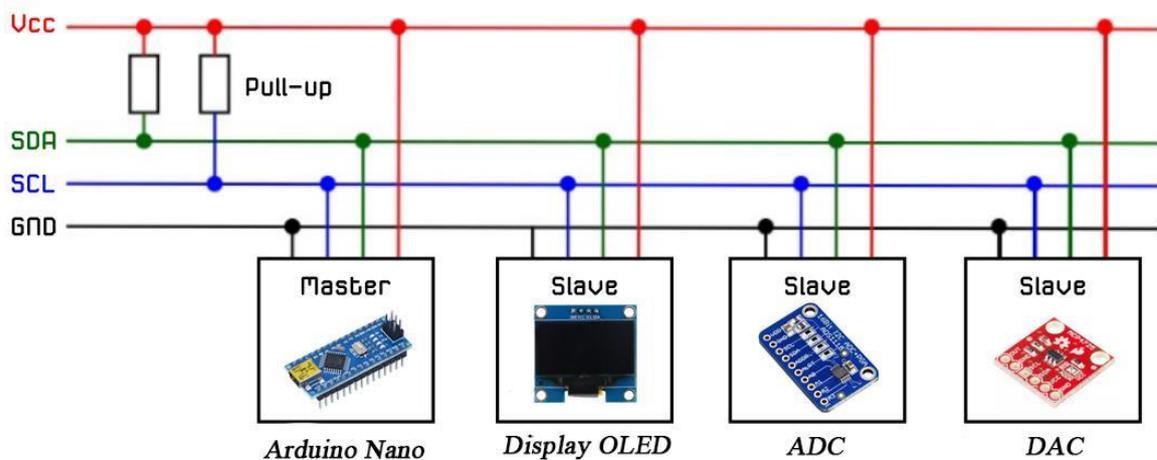


Fig. 8. Conexión de dispositivos en base a protocolo I2C.

2.3 Lazo estrategia de control empleada.

La fuente de alimentación regulada diseñada permite considerar el tipo de respuesta deseada en la salida. Se busca una respuesta con un transitorio rápido, sin sobrepaso, error cero en régimen permanente y alta capacidad de recuperación ante perturbaciones, como aumentos o desconexiones de carga. Estas características determinan que el control más adecuado para este caso es un control del tipo PID (Proporcional-Integral-Derivativo).

Existen diversas formas de implementar este control de manera eficiente. En este caso, se optó por un esquema de lazo de corriente interno y un lazo de tensión externo. Esta configuración permite un control predominante de la corriente sobre la tensión, limitando de manera más efectiva los

parámetros de salida y mejorando la estabilidad del sistema. Un diagrama de bloques representando al mismo puede observarse en la Figura 9.

El lazo de corriente interno actúa rápidamente para regular la corriente, mientras que el lazo de tensión externo se encarga de mantener la tensión de salida en el nivel deseado. Esta doble capa de control asegura una respuesta dinámica más precisa y robusta, adaptándose mejor a las variaciones en la carga.

Además, se ha incorporado una técnica de Anti Wind-Up para evitar el problema conocido como "integral wind-up" o "saturación del integrador". Este problema ocurre cuando el actuador del sistema alcanza sus límites físicos y no puede responder adecuadamente a las señales de control, lo que puede llevar a un comportamiento inestable e indeseado en el sistema. La implementación del Anti Wind-Up ayuda a prevenir este fenómeno, asegurando que el integrador del controlador PID no se sature y que el sistema mantenga su estabilidad y rendimiento óptimo.

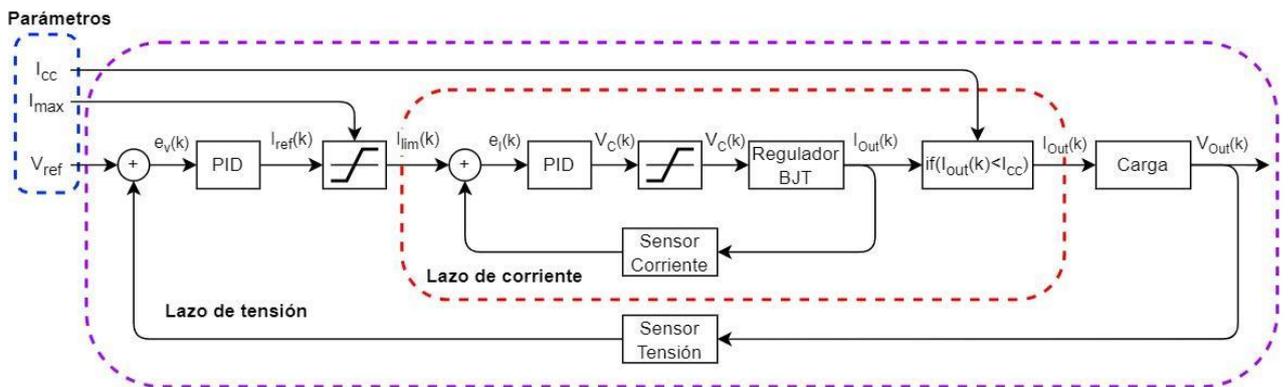


Fig. 9. Diagrama de bloques de la estrategia de control de la fuente DC.

La elección y configuración de este esquema de control PID, junto con las medidas preventivas contra el integral wind-up, aseguran que la fuente de alimentación regulada proporcione un rendimiento confiable y eficiente, cumpliendo con las exigencias operativas y garantizando una respuesta adecuada ante cualquier condición de carga.

Control ON-OFF: De manera de mantener una tensión estable a la salida de la fuente cuando no haya carga conectada, o se produzca un falso contacto, es mediante el uso de otro algoritmo de control, en este caso un ON-OFF. Cuya funcionalidad será mantener la tensión estable de modo de que se pueda verificar con un multímetro que en los pines de salida la tensión en la fuente se corresponde con la seteada. Ya que, de no emplearse esta medida, la tensión de salida sería inconsistente y oscilaría entre valores que podría dañar cargas conectadas o confundir al usuario de la misma.

3 Construcción y ensayos experimentales.

3.1 Construcción.

Se procedió a modelar una placa de circuito impreso (PCB) personalizada. Esta placa está diseñada para integrar todos los componentes necesarios y crear un prototipo funcional que permita realizar ensayos sobre materiales en una superficie comprimida.

La modelación y diseño del PCB se llevaron a cabo utilizando el software KiCad, reconocido por su amplia gama de herramientas de personalización de componentes. Este software permite a los diseñadores lograr un alto nivel de precisión y calidad en sus diseños, adecuándose a las habilidades específicas de cada usuario. Los resultados fueron los siguientes:

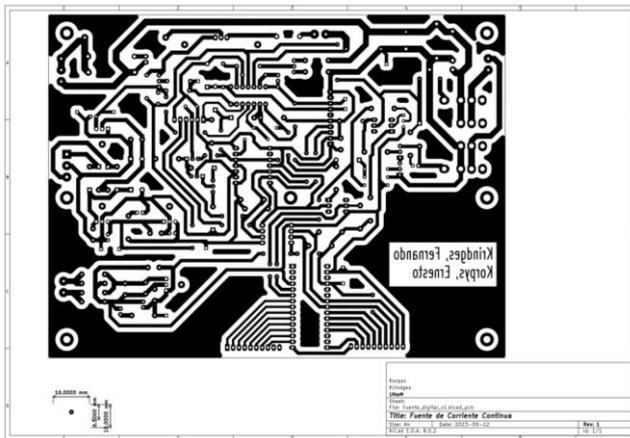


Fig 10. Modelo PCB de la placa.

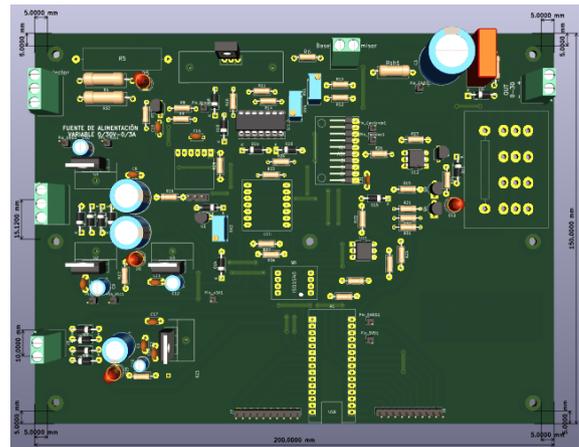


Fig 11. Modelado 3D de la placa.

En base a estos modelos se procedió con el ensamble y soldadura de los componentes a la placa que avanzó sin mayor inconveniente.

3.2 Ensayos y pruebas.

Una vez verificado la continuidad de las pistas, el apropiado funcionamiento de los componentes, los niveles de tensión en varios puntos, entre otros aspectos, se energiza la fuente con todos los transformadores para revisar el funcionamiento de la misma con todas las precauciones necesarias para evitar cualquier daño a los componentes.

En base a esto se realizó una serie de pruebas y ajustes para verificar el correcto funcionamiento de la fuente, dando con un resultado satisfactorio. Estos exámenes fueron realizados con el osciloscopio ya que este permite ver cómo está afectando el lazo de control a la salida de la misma que es lo que interesa en este caso.

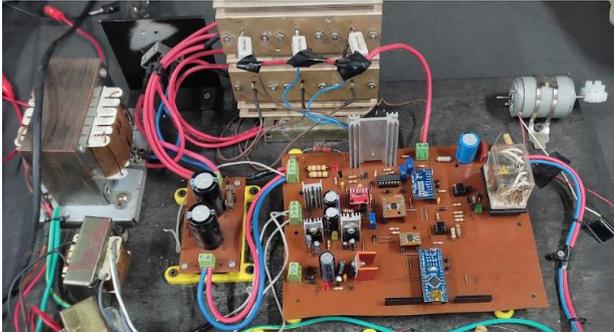


Fig 12. Modelo construido de la fuente CC.

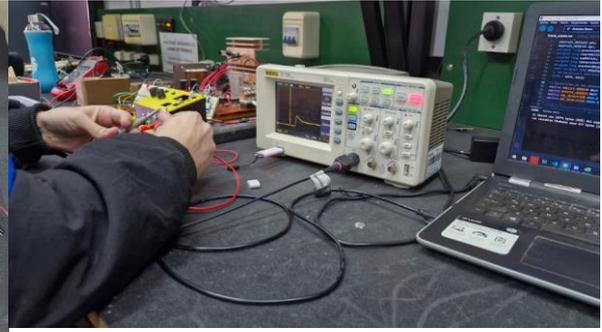


Fig 13. Verificando el funcionamiento de la fuente mediante el osciloscopio

Observaciones.

- Los transistores comienzan a operar con una acción de control mínima de 0,3V.
- El capacitor de salida se carga y dispara su voltaje en cuestión de unos milisegundos. Por lo que es necesario un aproximamiento y control especial cuando la fuente no arranca con una carga conectada.
- Cuando el DAC MCP4725 no tiene comunicación I2C, este pone en su salida un valor por defecto cargado en su memoria. Sin embargo, este puede ser modificado de la memoria EEPROM con unas líneas de código.

Mejoras a realizar.

- Ajuste de constantes de controlador.
- Ajuste de frecuencia de muestreo.
- Mejora de la estrategia de control.
- Reconstrucción de la placa.

4 Conclusiones.

Al ser una versión de prototipo claramente al momento de la primera energización no logró un desempeño sublime en la práctica. Sin embargo, esta ha reaccionado de manera concisa sin mayor número de inconvenientes, permitiendo resolver y ajustar múltiples cuestiones de rendimiento o detalles que permitió alcanzar un modelo totalmente funcional que ya está casi listo para llevarse a una versión definitiva.

En un futuro una versión más estable estará disponible para su utilización. En donde además de ser funcional, esta tendrá una mejor presentación en la maqueta.

Referencias

J. Matijak E. & Pelinski, «Diseño y construcción de una fuente de alimentación DC lineal con control digital de tensión y corriente,» Facultad de Ingeniería, UNaM, 2023.