SEP
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Toluca

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRÓNICA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

“ DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA FUENTE DE VOLTAJE REGULADA Y REGULABLE”

AUTOR:
ING. RAÚL REVERIANO PAZ GONZÁLEZ

DICTAMEN No. AS-1-146/2018

REVISOR:

ING VICTOR MANUEL CARRILLO RIVERA

Metepec, Estado de México, 28 de Enero 2019

TOLUCA

ISO 9001:2015 CERTIFIED

INDICE

CAPITULO	CONTENIDO		PAGINA
1	**CONCEPTOS FUNDAMENTALES**		1
	1.1	INTRODUCCION	1
	1.2	COMO FUNCIONA UNA FUENTE DE VOLTAJE	2
		1.2.1 Diagrama a bloques	2
		1.2.2 Transformador	2
		1.2.3 Rectificador	3
		1.2.4 Filtro	4
		1.2.5 Regulador	4
2	**FUENTE DE ALIMENTACION COMPLETA**		5
	2.1	CARACTERISTICAS ADICIONALES	5
	2.2	BLOQUES DE UNA FUENTE COMOPLETA	5
3	**DISEÑO DE UNA FUENTE BÁSICA**		6
	3.1	CIRCUITO DE UNA FUENTE BÁSICA	6
	3.2	CALCULOS PARA EL TRANSFORMADOR	6
	3.3	RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA CON INTEGRADOR	7
		3.3.1 Funcionamiento	7
		3.3.2 Conceptos teóricos	10
		3.3.3 Rizo del voltaje de salida	12
		3.3.4 Corriente de los diodos comparada con la corriente en la resistencia de carga	12

3.3.5 Cálculos para los diodos y el capacitor 13

4 CIRCUITOS ADICIONALES 16

4.1 REGULADOR DE VOLTAJE CON SALIDA VARIABLE 16

4.1.1 Circuito 16

4.1.2 Funcionamiento 17

4.1.3 Análisis circuital 17

4.1.4 Cálculos 18

4.1.5 Pruebas 18

4.2 REFORZADOR DE CORRIENTE 19

4.2.1 Circuito 19

4.2.2 Análisis circuital 19

4.2.3 Selección de componentesl 21

4.2.4 Pruebas 22

4.3 SENSOR Y PROTECTOR DE SOBRECORRIENTE 22

4.3.1 Circuito 22

4.3.2 Funcionamiento 23

4.3.3 Cálculos 23

4.4 INDICADOR DE SOBRECORRIENTE 24

4.4.1 Circuito 24

4.4.2 Funcionamiento 25

4.4.3 Cálculos 25

4.5 DIAGRAMA COMPLETO 26

5 PRUEBAS Y MEDICIONES FINALES 27

5.1 IMPEDANCIA DE SALIDA 27

5.2	CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO	27
5.3	PORCENTAJE DE REGULACIÓN	27
5.4	PORCENTAJE DE RIZO PARA DIFERENTES VOLTAJES	28
5.5	CONCLUSIONES	28
APENDICE 1	**LISTA DE COMPONENTES**	29
APENDICE 2	**IMÁGENES DEL PROCESO DE ARMADO**	30

CAPITULO 1

CONCEPTOS FUNDAMENTALES

1.1 INTRODUCCIÓN.

Sabiendo de la necesidad que tienen los alumnos de la carrera de Mecatrónica de un laboratorio propio para realizar las prácticas del área de electrónica y no estar esperanzados a la disponibilidad del laboratorio de otra carrera, se propuso a la administración del Instituto Tecnológico de Toluca comenzar a habilitar

un laboratorio para prácticas de electrónica para la carrera de Mecatrónica, en el que aparte de los equipos de medición que se requieren, es imprescindible que dicho laboratorio cuente con suficientes fuentes de alimentación de corriente continua.

Dado que en la Institución se tiene personal capacitado para realizar el diseño y la fabricación de las fuentes que se requieren y con el objetivo de reducir costos, se propuso que durante un año sabático se realizara el diseño y la fabricación de un prototipo de las fuentes que pudieran utilizarse para el laboratorio, el cual fue aceptado.

Como primer punto, se realizó un sondeo entre maestros y alumnos de la carrera de mecatrónica acerca de las características que deben tener las fuentes, llegándose a la conclusión de que una fuente lineal, variable de 0 a 25 volts, con 1. Ampere de corriente de salida máxima, un rizo máximo de 1 % y un porcentaje de regulación del 2 % cumple con los requerimientos para la mayoría prácticas que se realizan en las diferentes asignaturas de electrónica analógica y digital.

El presente trabajo tiene como objetivo no solo el diseño y construcción de una fuente, sino hacer una descripción detallada de los criterios que deben tomarse en cuenta para que se tome como un manual y con base a él, en un futuro, puedan construir fuentes con diferentes valores de corriente y voltaje de salida para nuevas aplicaciones y hacer las reparaciones pertinentes por personal con conocimientos medios de electrónica.

ISO 9001:2015
CERTIFIED

1.2 COMO FUNCIONA UNA FUENTE DE VOLTAJE

Una fuente de voltaje funciona como una batería, ambos proporcionan alimentación de corriente continua a un circuito electrónico, pero una fuente de voltaje convierte el voltaje alterno que se suministra por la CFE en un toma corriente, a un voltaje menor y continuo; y debido a que se encuentra conectada a un toma corriente, una fuente de voltaje no se descarga en comparación con una batería, pero claro, la fuente debe de estar siempre conectada al tomacorriente de corriente alterna.

1.2.1 Diagrama a bloques

El funcionamiento de una fuente de voltaje básica consta de varias etapas que son:

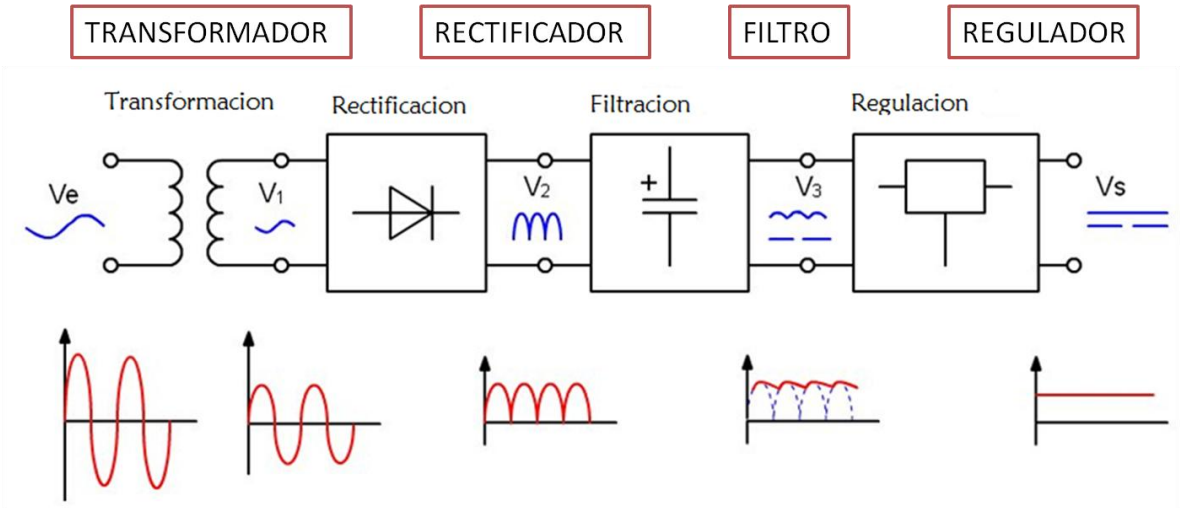


Fig. 1 Diagrama a bloques de una fuente de voltaje básica y función de cada bloque

1.2.2 Transformador

Un transformador está constituido por dos bobinas devanadas sobre un núcleo cerrado de hierro dulce, el primer devanado se conoce como primario y el segundo devanado se conoce como secundario.

La función principal del transformador es modificar el nivel de voltaje entre el primario y el secundario. Si el número de vueltas del devanado secundario es menor

ISO 9001:2015 CERTIFIED

que el del primario, el voltaje en el secundario será de menor valor y se denomina transformador reductor, en caso contrario, si el número de vueltas del secundario es mayor que el del primario, el voltaje se salida será mayor y se le denominará transformador elevador.

1.2.3 Rectificador

Aprovechando la propiedad que tienen los diodos de conducir solo en una dirección, el rectificador se encarga de convertir el voltaje alterno en directo por medio de diodos.

En la entrada del rectificador se tiene un voltaje alterno proveniente del secundario del transformador, mientras que en su salida se tendrá un voltaje directo con un polo positivo y otro polo negativo.

Existen dos tipos de rectificadores.

a) De media onda
   Funciona con un solo diodo, pero solo aprovecha el semiciclo positivo de La señal de entrada

a) De onda completa
   Puede realizarse con dos diodos, pero requiere de un transformador de derivación central y en cada semiciclo solo trabaja la mitad del transformador.

   Con cuatro diodos, al cual se le llama tipo puente, no requiere que el transformador tenga derivación central, por lo tanto el voltaje del secundario será el total del devanado y es el que se utilizará en el presente diseño.

   En ambos casos, tanto en el de dos como en el de cuatro diodos se aprovecha tanto el semiciclo positivo como el negativo.

ISO 9001:2015
CERTIFIED

1.2.4 Filtro

Si con un osciloscopio se mide la tensión que se obtiene a la salida del rectificador, se observará que la tensión no es totalmente continua, sino que la onda rectificada que se obtiene del puente de diodos es un voltaje que aumenta de cero a un valor pico para luego descender nuevamente a cero.

A este tipo de variaciones en el voltaje se le conoce con el nombre de rizo, el cual no es el adecuado para los diferentes circuitos electrónicos y debe reducirse al mínimo posible mediante el uso de un filtro

1.2.5 Regulador

Si se mide la tensión que proporciona la CFE a través del tomacorriente a diferentes horas del día, se encontrará que lo que en condiciones ideales debería ser 127 Volts a 60 Hz, no es así, sino que sufre variaciones hacia arriba y hacia abajo, ocasionando que el voltaje que se obtiene a la salida de la fuente también varíe. Así mismo ocurre que si se cambia la resistencia de carga, la tensión continua medida en la carga también variará.

Para evitar estas situaciones es necesario regular la tensión continua que sale del filtro y así obtener la tensión constante, que no varié al cambiar el voltaje de línea o la resistencia de carga.

ISO 9001:2015
CERTIFIED

CAPITULO 2

FUENTE DE ALIMENTACIÓN COMPLETA

2.1 CARACTERÍSTICAS ADICIONALES

Puesto que las fuentes de los laboratorios son utilizadas en muchos casos por estudiantes inexpertos que frecuentemente causan corto circuito, se decidió que las características de la fuente a diseñar debe tener finalmente siguientes características adicionales.

1. Voltaje de salida variable de 0 a 25 volts ± 2 %
2. Corriente de salida máxima de 2 Amperes durante una hora
3. Con un rizo máximo del 1 % a plena carga
4. Porcentaje de regulación mínimo de 2 %
5. Protección electrónica contra corto circuito
6. Indicador externo de sobrecorriente.
7. Display indicador de voltaje y corriente de salida

2.2 BLOQUES DE UNA FUENTE DE ALIMENTACION COMPLETA

Para el diseño completo de la fuente de alimentación lineal que cumpla con los requisitos previamente establecidos del presente proyecto se considerará finalmente los siguientes bloques

1. Transformador reductor
2. Rectificador de onda completa tipo puente
3. Filtro capacitivo
4. Regulador de voltaje con salida de voltaje variable.
5. Reforzador de corriente
6. Detector y protector de sobre corriente
7. Indicador de sobre corriente
8. Display de voltaje y corriente de salida

ISO 9001:2015 CERTIFIED

CAPITULO 3

DISEÑO DE UNA FUENTE DE VOLTAJE BÁSICA

3.1 CIRCUITO DE UNA FUENTE BÁSICA

La figura 1 es el clásico circuito rectificador de onda completa con filtro capacitivo diseñado para suministrar una tensión continua rectificada y filtrada que posteriormente usaremos para alimentar nuestros amplificadores operacionales y la sección de potencia del circuito.

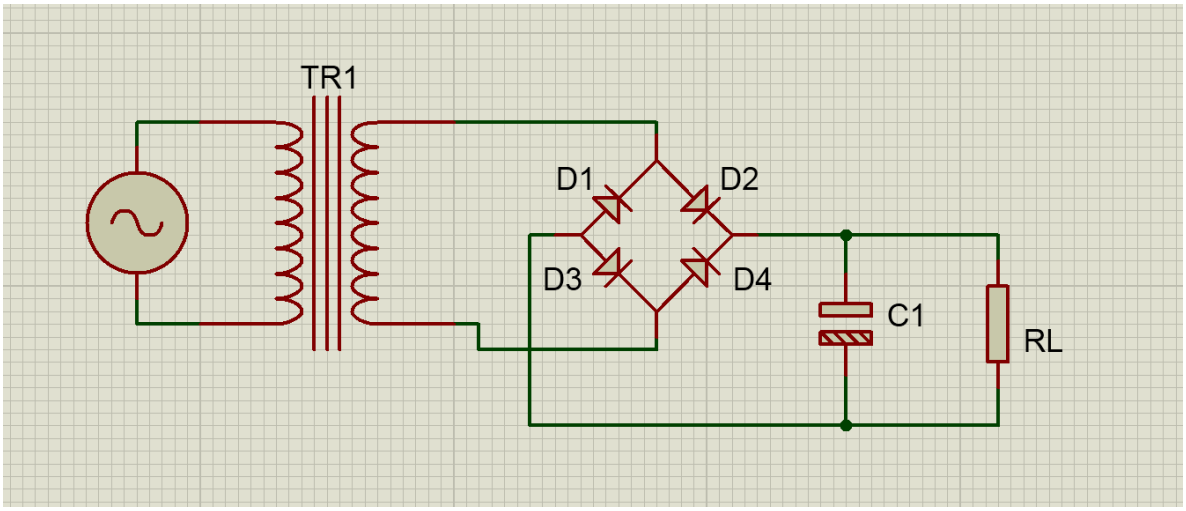


Fig 2. Fuente de voltaje básica con rectificador tipo puente y filtro capacitivo

3.2 CÁLCULOS PARA EL TRANSFORMADOR

Como primer punto se considerará un transformador reductor, donde con la alimentación proporcionada por la CFE que es de $127V_{RMS}$ de corriente alterna y una frecuencia de 60 Hertz y considerando nuestros requerimientos de tensión de salida, el transformador deberá ser de $24V_{RMS}$ con una capacidad de corriente

ISO 9001:2015 CERTIFIED

mínimo de 3A, debido a que, aunque solo se le van a demandar como máximo 2.A, por seguridad nunca debe trabajarse en los límites máximos, para que así nuestro condensador quede cargado al valor máximo de:

$$V_{C1} = 24\sqrt{2} - 1.4 = 32.54\ v$$

Al realizar la compra del transformador se optó por adquirir uno de 3 A, debido a que el costo entre el de 2 A y el de 3 A no variaba demasiado, además de que se tiene un mejor funcionamiento y la posibilidad de aumentar la disponibilidad de corriente para la carga.

En términos reales, la tensión de nuestro transformador medida en vacío fue:

$$V_{op} = 25v$$

La tensión a corriente nominal (3A) bajó a:

$$V_{op} = 22.3v$$

La corriente suministrada a la carga fue de

$$I = 2.8\ A$$

Estos resultados nos indican que aunque el valor nominal del transformador sea de 24 Volts RMS, el voltaje de salida depende de la carga que se le conecte y que aunque la corriente nominal sea de 3 Amp., la tensión de salida se mantiene a un valor razonablemente constante solo si la corriente no excede de 2.8 Amp.

3.3 RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA CON INTEGRACIÓN

3.3.1 Funcionamiento

En la figura 2 puede verse que cuando el voltaje del secundario se encuentra en el semiciclo positivo los diodos D2 y D3 conducen, (D1 y D4 no conducen) siendo el voltaje de salida del puente de diodos positiva igual que el secundario. Cuando el voltaje del secundario se encuentra en el lado negativo D1 y D4 conducen, (D2 y D3 no conducen), proporcionando una nueva trayectoria a la corriente, de manera que aunque se invierte el voltaje de entrada del secundario, el voltaje de salida del puente de diodos, el cual se conecta a la carga sigue siendo de la misma polaridad, como puede verse en la figura, puesto que la corriente fluye en el mismo sentido tanto en el semiciclo positivo como en el negativo

ISO 9001:2015
CERTIFIED

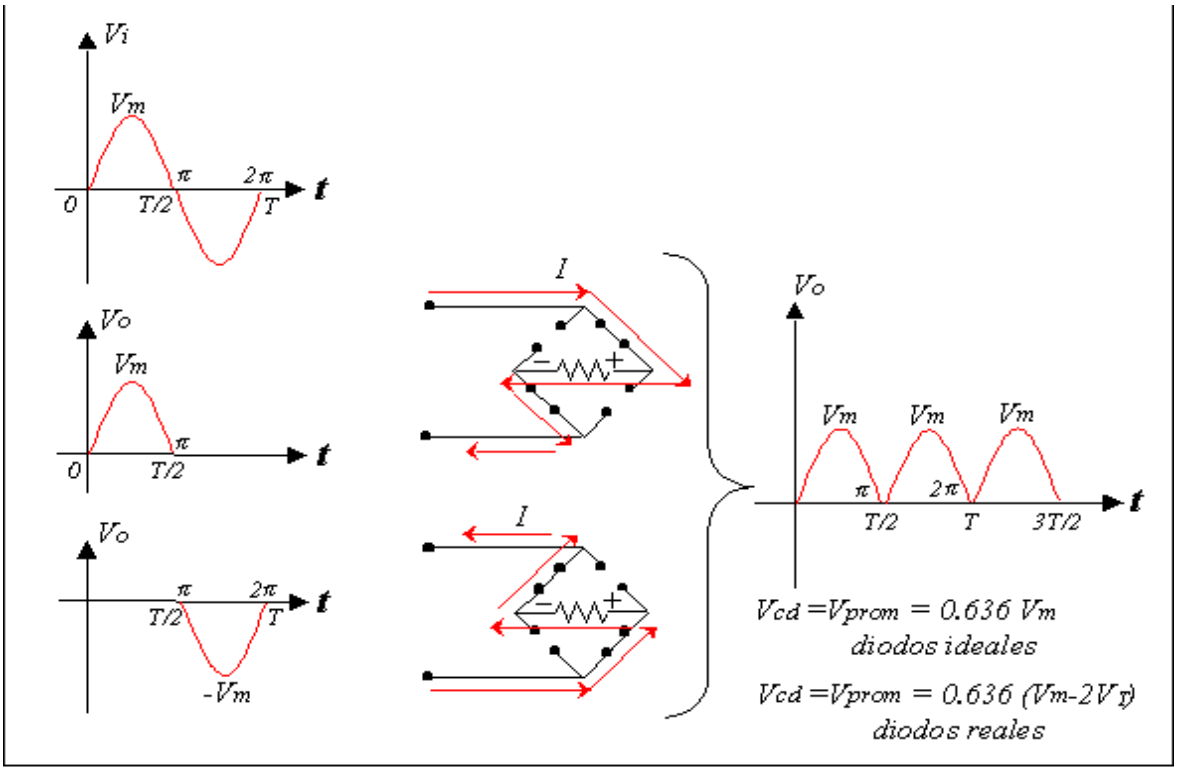


Fig. 3 Funcionamiento del rectificador tipo puente para cada semiciclo

Por otra parte, en las figuras siguientes se puede observar, que cuando los diodos D2 y D3 del rectificador de la Fig. 2 conducen, el capacitor se carga al voltaje pico (Vp). Una vez que se alcanza el pico positivo, los diodos se abren, ya que el capacitor tiene un voltaje **Vp** en sus extremos y el voltaje en el secundario del transformador es un poco menor que Vp, por lo tanto, el cátodo de los diodos está a más tensión que el ánodo, polarizando inversamente a los diodos.

Debido a esto el capacitor inicia su descarga a través de la resistencia de carga porque durante ese tiempo los 4 diodos no conducen, aislando a la red RC. Bajo esas condiciones ahora el capacitor tiene que suministrar la energía a la resistencia de carga, disminuyendo su voltaje al valor **Vd** y hacer que el voltaje de la carga no baje demasiado de Vp. Al mismo tiempo el voltaje del siguiente semiciclo del secundario del transformador comienza a incrementarse y cuando el voltaje del secundario sea mayor que el del capacitor el diodo volverá a conducir y así carga nuevamente el capacitor, por lo que el voltaje queda de la siguiente manera:

ISO 9001:2015 CERTIFIED

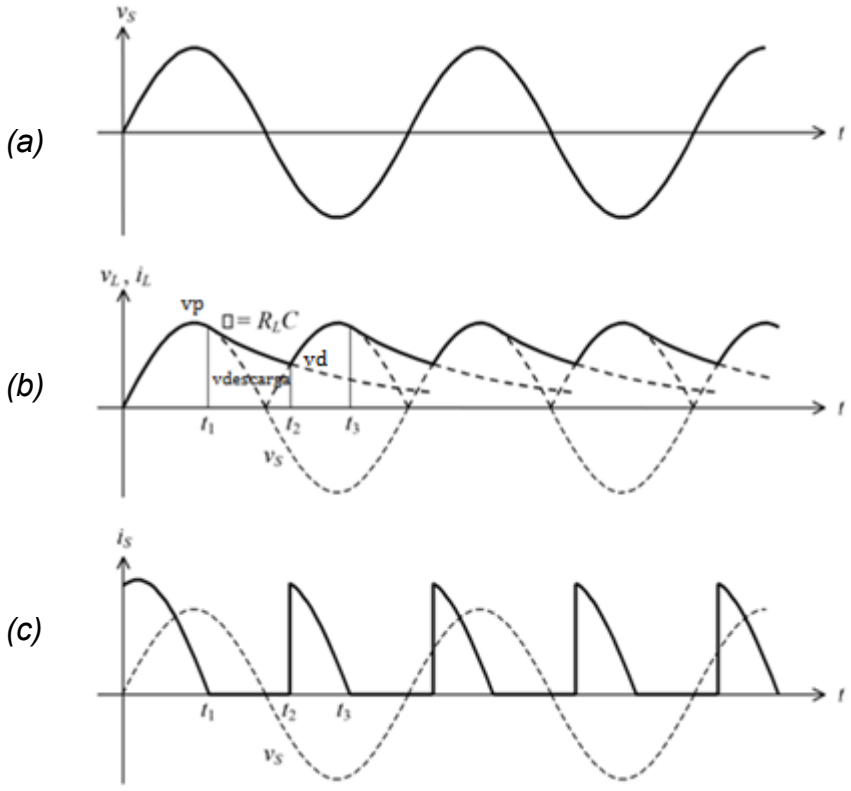


Fig Proceso de filtrado de la señal y corriente en los diodos

(a) Señal de salida del transformador
(b) Señal de salida del filtro, con rectificador de onda completa y media onda
(c) *Corriente en los diodos durante la conducción*

En la gráfica (a), se muestra la señal de salida del secundario del transformador

En la gráfica (b), con línea continua, se muestra la señal de salida en la carga, utilizando un rectificador de onda completa y en esa misma gráfica pero con línea punteada, la señal de salida en la carga, suponiendo que se utiliza un rectificador de media onda. En esta grafica se observa que el tiempo de descarga es mayor en el de media onda que en de onda completa, por lo tanto el voltaje del capacitor Vd disminuye más y por lo tanto el rizo aumenta.

En la gráfica (c), se muestra que la corriente que fluye a través de los diodos cuando se carga el capacitor, es solo durante el tiempo $t_c = \Delta t = t_3 - t_2$, el cual es muy pequeño y que durante el tiempo de descarga del capacitor $t_d = t_2 - t_1$ la corriente en los diodos es cero, porque ésta fluye a través de la resistencia de carga.

ISO 9001:2015
CERTIFIED

En esta misma gráfica se puede intuir que si se quiere reducir el rizo, el voltaje Vd debe ser mayor, ocasionando que el tiempo de carga del capacitor disminuya. Pero como la cantidad de carga consumida por R_L que se necesita reponer es la misma, ocasiona que el pico de corriente en los diodos durante Δt se incremente mucho.

3.3.2 Conceptos teóricos

De la fig. 4 (b), puede observarse que el voltaje medio en la carga con el capacitor conectado es con una muy buena aproximación

$$V_m \approx \frac{(V_p + V_d)}{2}$$

Siendo

V_m el voltaje promedio que estará alimentando a la carga, también llamado V_{cc}

V_p el voltaje máximo al cual se carga el capacitor al transcurrir el tiempo t_c

V_d el voltaje mínimo que tendrá el capacitor después de transcurrido el tiempo t_d

Como el capacitor se cargó al valor pico, al comenzar a disminuir el voltaje proveniente del secundario del transformador, el diodo se polariza inversamente, aislando al circuito R_LC de la fig 2. Ocasionando la descarga del capacitor de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$V_{d(t)} = V_p e^{-t/RC}$$

Nota. En esta ecuación se considerará a la resistencia de carga R_L solo como R, para evitar confusiones por el subíndice .

Teniendo en cuenta que el período T es:

$$T = t_c + t_d$$

Además, como el tiempo de carga es muy pequeño comparado con el tiempo de descarga ($t_c \ll t_d$), se considerará que $t_d \approx T$

Y se tiene entonces que el voltaje del capacitor transcurrido el tiempo de descarga es:

ISO 9001:2015 CERTIFIED

$$V_d = V_p e^{-T/RC}$$

Además se sabe que e^x en la expansión Taylor es:

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \cdots, \qquad -\infty < x < \infty$$

y aplicando esta expresión para el voltaje de descarga con solo dos términos:

$$e^{-T/RC} = \left(1 - \frac{T}{RC}\right)$$

Entonces se tiene que:

$$V_d = V_p e^{-T/RC} = V_p \left(1 - \frac{T}{RC}\right)$$

Por lo tanto cuando haya transcurrido un tiempo t_d el voltaje en el capacitor será:

$$V_d = V_p \left(1 - \frac{T}{RC}\right)$$

Finalmente el voltaje medio en el capacitor será:

$$V_m = \frac{(V_p + V_d)}{2} = V_p - \frac{V_p T}{2RC} = V_p \left(1 - \frac{T}{2RC}\right)$$

$$V_m = V_p \left(1 - \frac{T}{2RC}\right)$$

Y como

$$T = \frac{1}{f}$$

$$V_m = V_{cc} = V_p \left(1 - \frac{1}{fRC}\right)$$

ISO 9001:2015
CERTIFIED

3.3.3 Rizo del voltaje de salida

Para el cálculo del rizo ΔV. De la figura anterior se puede ver que:

$$\Delta V = V_p - V_d$$

Sustituyendo el valor de V_d obtenido anteriormente

$$\Delta V = V_p - V_p \left(1 - \frac{T}{RC}\right)$$

$$\Delta V = \frac{V_p T}{RC}$$

Además como $T = \frac{1}{f}$ se tiene finalmente que el voltaje de salida en la carga tiene un rizo de:

$$\Delta V = \frac{V_p}{f R_L C}$$

También, de acuerdo a la ley de Ohm $I_p = \frac{V_p}{R_L}$

$$\Delta V = \frac{I_p}{fC}$$

3.3.4 Corriente en los diodos comparada con la corriente en la carga

En lo relativo a la corriente del diodo durante la carga y la corriente en R_L durante la descarga, de la figura se puede ver que el capacitor se descarga en un tiempo t_d, pero tiene que reponer la carga en un tiempo Δt (t_c) muy pequeño

Y como la carga transferida durante la carga y la descarga es la misma:

$$Q_c = Q_d$$

Además, como la corriente durante la carga fluye a través de los diodos

ISO 9001:2015 CERTIFIED

$$Q_c = \int_0^{\Delta t} I\, dt = I_D\ \Delta t$$

Y la corriente durante la descarga fluye a través de la carga

$$Q_d = \int_0^{T} I\, dt = I_L\, T$$

Igualando ambas ecuaciones se tiene

$$I_D\ \Delta t = I_L\, T$$

Despejando la corriente en los diodos

$$I_D = I_L\, \frac{T}{\Delta t}$$

Donde el valor de Δt está dado por la siguiente ecuación

$$\Delta t = \frac{T}{2\pi}\left(\frac{2\Delta V}{V_p}\right)^{1/2}$$

Finalmente tendremos que:

$$I_D = I_L\, \frac{2\pi}{\left(\frac{2\Delta V}{V_p}\right)^{1/2}}$$

3.3.5 Cálculos para los diodos y el capacitor

Sabiendo que el voltaje del secundario del transformador es de $24\mathrm{V_{RMS}}$

$$V_{picoSec} = 24\sqrt{2} = 33.6\ v$$

Descontando la caída de voltaje en los diodos

$$V_{picoCap} = 24\sqrt{2} - 1.4 = 32.2\ v$$

Por lo que debe seleccionarse un capacitor que por seguridad soporte un 30% más de ese valor (41.8V).

ISO 9001:2015 CERTIFIED

El valor comercial más cercano es 50 V

En cuanto a la capacitancia, los valores comerciales más comunes son de 2200 µf y de 3300 µf.

Utilizando un capacitor de 2200 µf, el Rizo que se tendrá a un voltaje de salida de V_{CC} de 32.2 con una resistencia de carga de 32.2Ω, para que la corriente en la carga sea de 1 A, es:

$$\Delta V = \frac{V_p}{f R_L C} = \frac{32.2}{120\text{x}32.2\text{x}2200\ \mu\text{f}} = 3.78\ V_{pp}$$

Convirtiendo los $3.78\ V_{pp}$ a voltaje eficaz es 1.33 V_{ef}

Por lo tanto el porcentaje de rizo será de

$$\%\ \text{Rizo} = \frac{V_r}{V_{max}} = \frac{1.33}{32.2 + 1.89} = 3.91\ \%$$

Si se utiliza un capacitor de 3300 µf.

$$\Delta V = \frac{V_p}{f R_L C} = \frac{32.2}{120\text{x}32.2\text{x}3300\ \mu\text{f}} = 2.52\ V_{pp}$$

Que representa un rizo del 2.62 %

En ambos casos el rizo es aceptable, considerando además que se verá reducido aún más cuando se le agreguen el regulador y los demás circuitos adicionales.

En cuanto a las características de los diodos del rectificador, tomando como base una corriente máxima de 2 A en la resistencia de carga, cuando se tenga el voltaje máximo de 25 Volts en la carga, la resistencia de carga deberá ser de 12.5 Ω y los diodos deberán soportar una corriente constante de 2 A.

ISO 9001:2015 CERTIFIED

Pero durante la carga del capacitor y solo durante el tiempo $\mathbf{t_c}$, los diodos deberán soportar una corriente instantánea mucho mayor como a continuación se calcula

Utilizando un capacitor de 2200 µf que produce un rizo de $3.78\ V_{pp}$ a plena carga y máximo voltaje, la corriente instantánea será de:

$$I_D = I_L \frac{2\pi}{\left(\frac{2\Delta V}{V_p}\right)^{1/2}} = 2 \frac{6.28}{\left(\frac{2x3.78}{25}\right)^{1/2}}$$

$$I_D = 22.84\ A$$

Si se utilizara un capacitor de 3300 µf que produce un rizo de $2.52\ V_{pp}$ a plena carga y máximo voltaje, la corriente instantánea será de:

$$I_D = I_L \frac{2\pi}{\left(\frac{2\Delta V}{V_p}\right)^{1/2}} = 2 \frac{6.28}{\left(\frac{2x2.52}{25}\right)^{1/2}}$$

$$I_D = 27.97\ A$$

En cuanto al voltaje de polarización inversa que como máximo deberán soportar los diodos, será de $V_{picoSec}$ menos la caída de voltaje en un diodo que es de 0.7 V, por lo tanto será de 32.9 V, por lo que un diodo con matrícula 2N 4007 cumple con los requisitos establecidos.

ISO 9001:2015 CERTIFIED

CAPÍTULO 4

CIRCUITOS ADICIONALES

4.1 REGULADOR DE VOLTAJE CON SALIDA VARIABLE

4.1.1 Circuito

Para tener voltajes de referencia estables con respecto a las variaciones en el voltaje de línea, en el valor de la carga, la temperatura o el envejecimiento de los elementos utilizados, se hará uso del siguiente circuito con un amplificador operacional, en el que un diodo zener con voltaje de ruptura entre 8 y 10 volts (que son los mas estables), fija el voltaje de referencia.

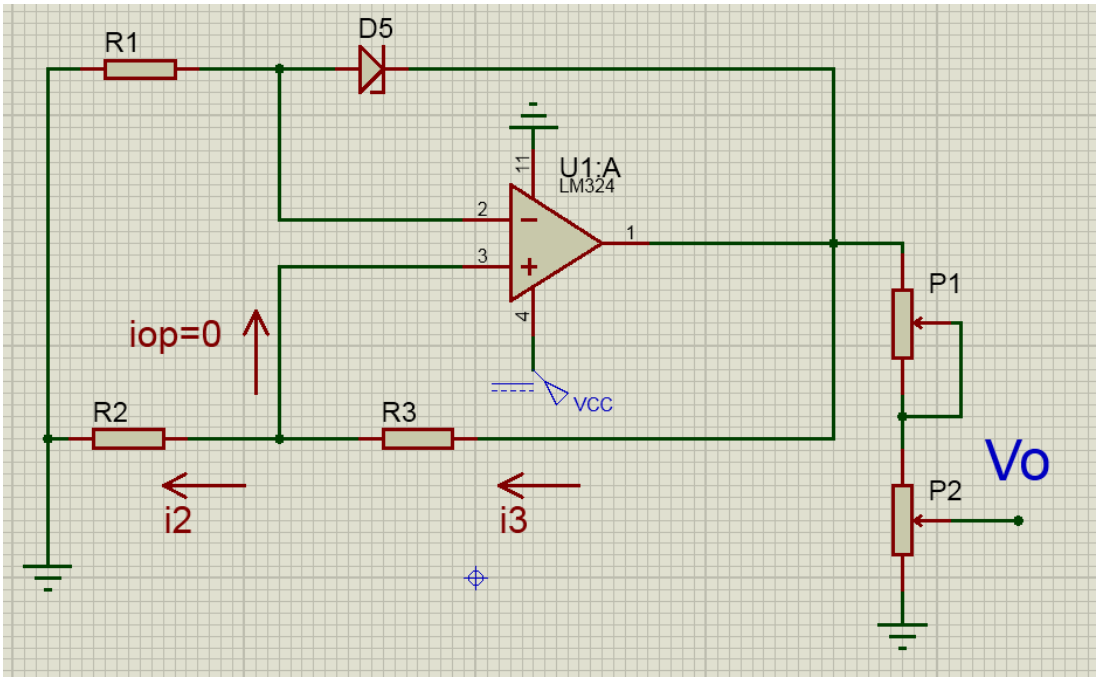


Fig. 5 Regulador de voltaje con salida variable

ISO 9001:2015 CERTIFIED

4.1.2 Funcionamiento

El circuito de la fig 5 consta de dos redes de retroalimentación, donde el divisor de tensión formado por R_2 y R_3 determina el voltaje en R_1 que sumado al voltaje fijo del diodo zener nos proporciona un voltaje V_o independiente de cualquier variación en el voltaje de línea y del cambio en el valor de la resistencia de carga R_L .

El voltaje de salida ajustable lo obtenemos conectando a la salida del amplificador operacional dos resistores variables, uno de valor alto para seleccionar el voltaje de salida de manera gruesa y otro de menor valor para ajustar de manera fina el voltaje seleccionado.

4.1.3 Análisis circuital

La función de transferencia de este circuito es:

Para la rama del diodo Zener

$$V_o = V_Z + V_{R1}$$

Pero como el voltaje diferencial del amplificador operacional es aproximadamente igual a cero

$$V_{R1} = V_{R2}$$

Para el divisor de tensión de la segunda rama

$$V_{R2} = V_o \frac{R_2}{R_2 + R_3} = V_{R1}$$

Sustituyendo en la primera ecuación

$$V_o = V_Z + V_o \frac{R_2}{R_2 + R_3}$$

Despejando Vo, finalmente se tiene que:

$$V_0 = \frac{V_Z(R_2 + R_3)}{R_3}$$

De esta ecuación se observa que el voltaje de salida solo depende del voltaje del diodo zener conjuntamente con los valores de R_2 y R_3, por lo tanto como V_Z es un

ISO 9001:2015
CERTIFIED

voltaje fijo, la función de R_2 y R_3 es determinar el voltaje deseado, pero deberá hacerlo con una corriente de retroalimentación pequeña, para disponer de suficiente corriente para la carga (Los dos potenciómetros).

4.1.4 Cálculos

Si se requiere un voltaje de salida de alrededor de 25 Volts y se propone un diodo Zener de 9.1 Volts, con una R_3 = 10 KΩ y R_2 = 4.7 KΩ, se tendrá a la salida de este operacional un Vo .

$$V_0 = \frac{V_Z(R_2 + R_3)}{R_3} = \frac{9.1(4.7K + 10K)}{10K} = 13.37\ V$$

La función que desempeña R_1 es limitar la corriente que circule por el diodo zener cuando llegue al voltaje de ruptura, por lo que con el voltaje de alimentación de 13.37 volts, una resistencia R_1 = 2.2 KΩ proporciona una corriente de 6 mA, valor que queda dentro de los rangos de trabajo del diodo seleccionado.

4.1.5 Pruebas

Se hicieron varias pruebas con diferentes valores de Vz y diferentes valores en los resistores y se observó como el voltaje Vo concuerda con los cálculos pero además y lo mas importante la tensión Vo se mantiene estable aun cuando la tensión de alimentación del amplificador operacional varíe.

Como mencionamos, este circuito será alimentado con el bloque anterior (Voltaje del capacitor) y aún cuando la tensión de red varíe a lo largo del día, entonces este circuito nos garantiza tener una tensión estable de referencia sin importar la variación de la tensión de red.

Conectamos diversas cargas a la salida del amplificador operacional para exigirle corriente llegando a suministrar hasta 25 mA

Se comprobó que voltaje del Zener que más nos favorece en estabilidad respecto a la temperatura y corriente es el diodo zener de 9.1v. lo cual concuerda con los datos teóricos.

ISO 9001:2015 CERTIFIED

4.2 REFORZADOR DE CORRIENTE

4.2.1 Circuito

Dado que los amplificadores operacionales proporcionan una corriente de salida de solo unos cuantos miliamperes y que los requerimientos de la corriente en la carga que se conectará a la fuente será del orden de los amperes, es necesario utilizar transistores de potencia para poder suministrar a la carga corriente de valor elevado.

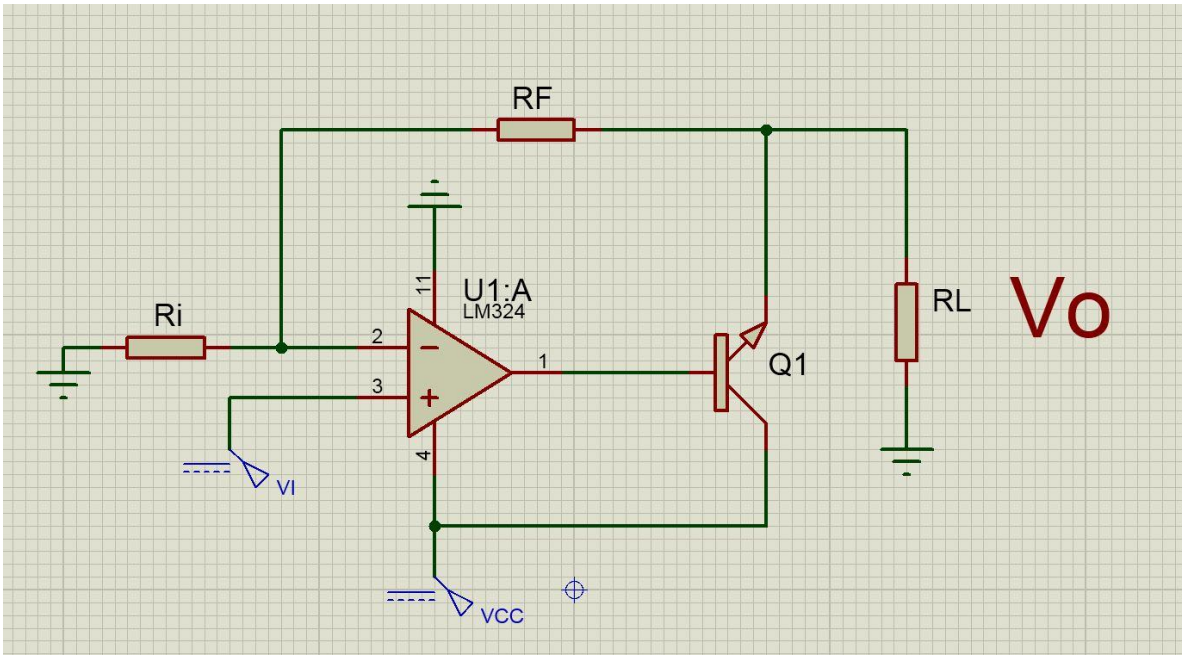


Fig.6 Circuito reforzador de corriente mediante transistor de potencia

4.2.2 Análisis circuital

La figura 6 muestra el circuito básico de un amplificador no inversor reforzado en corriente, cuyo análisis circuital se muestra a continuación.

ISO 9001:2015 CERTIFIED

Para el nodo de entrada.

$$I_i = I_f$$

$$R_f V_i = RiV_o - Ri\, V_i$$

$$Vi(Ri + R_f) = RiV_o$$

$$V_o = \frac{(Ri + R_f)}{Ri} V_i$$

Esta ecuación nos indica que la tensión de salida la podemos seleccionar en función de los resistores R_f y Ri y del voltaje de referencia, que será tomado del divisor de tensión conectado a la salida regulador de voltaje.

Analizando el nodo de salida se tiene:

$$I_f + I_L = I_E$$

$$I_E = I_L - I_f$$

Pero como

$$I_L \gg I_f$$

$$I_L \approx I_E$$

Lo cual indica que la corriente que alimente a R_L será suministrada principalmente por la fuente V_{cc} (salida del filtro) a través del emisor del transistor, pero la magnitud del voltaje estará controlado por la salida del regulador.

Por otro lado:

La corriente máxima que puede ser suministrada a la carga R_L queda en función de la β del transistor ya que:

$$I_i + I_L = I_E = (\beta + 1)\, I_b$$

ISO 9001:2015 CERTIFIED

Pero puede verse del circuito que la corriente I_b es la corriente de salida del amplificador operacional, por lo tanto:

$$I_L = I_E - I_i = (\beta + 1)\, I_o - I_i$$

Para fines prácticos como la β es grande y la corriente I_i es pequeña, la corriente máxima que puede suministrarse a la carga es:

$$I_{LMax} = \beta\ I_{oMax}$$

Si se quieren obtener corrientes en la carga todavía más grandes, se puede utilizar la configuración Darlington:

Donde la corriente en la carga podrá ser hasta:

$$I_{LMax} = (\beta_1\, \beta_2)\, I_{oMax}$$

4.2.3 Selección de componentes

El circuito de la configuración Darlington está formado por dos transistores conectados en colector común. El primero debe ser de pequeña señal debido a que este tipo de transistores tienen una beta grande, el segundo debe ser de potencia, aunque la beta sea pequeña.

Para este caso se elige un transistor de pequeña señal con matrícula BD139, que tiene una β = 150 como mínimo y un transistor de potencia con matrícula LM3055 que soporta corrientes hasta de 10 A.

Con estos transistores formando la configuración Darlingtog y conociendo que la corriente I_{oMax} del amplificador operacional es de alrededor de 20 mA, se tiene que tomando las betas mínimas, se puede manejar en la resistencia de carga una corriente hasta de :

$I_{LMax} = (\beta_1\, \beta_2)\, I_{oMax}$ = 100*10*0.020 = 20 A

Satisfaciendo ampliamente los requerimientos del diseño

ISO 9001:2015 CERTIFIED

4.2.4 Pruebas

Utilizamos distintos valores de R_f y R_i para obtener diversos valores de tensión.

A la salida conectamos diversas cargas para consumir distintos valores de corrientes.

En una siguiente prueba colocamos un arreglo Darlington para obtener una ganancia mayor y poder manejar corrientes mayores.

En todos los casos los resultados fueron satisfactorios comparado con la teoría

4.3 SENSOR Y PROTECTOR DE SOBRECORRIENTE

4.3.1 Circuito

El circuito de la Fig. 7 es un circuito comparador en el que el voltaje aplicado a las terminales de entrada del amplificador operacional es la suma algebraica del voltaje de barrera del diodo D_1 y la caída de voltaje del resistor R_3. lo cual nos permite proteger la fuente mediante la limitación de corriente máxima en la salida

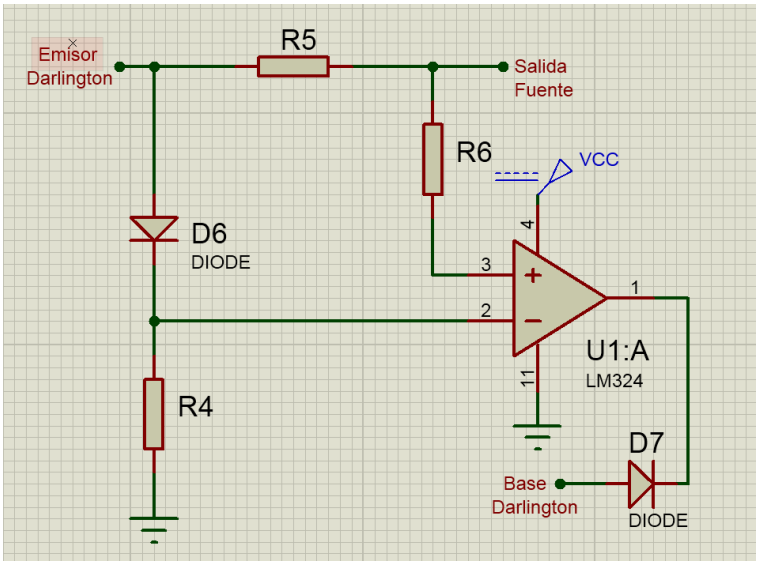


Fig. 7 Circuito sensor de la corriente en la carga

ISO 9001:2015
CERTIFIED

4.3.2 Funcionamiento

En este circuito, la entrada del resistor R_5 se conectará a la salida del reforzador de corriente y la otra terminal a la salida de la fuente, con lo cual R_5 queda en serie con la resistencia de carga de la fuente, por lo tanto circulará la misma corriente que en la carga conectada a la fuente. El ánodo del diodo D_7 se conectará a la base de arreglo Darlington a través de una resistencia limitadora de corriente.

Los voltajes del diodo D_6 y R_5 son de polaridad opuesta, con lo cual se presentan dos posibles condiciones:

1. Si la corriente en R_5 (que es la misma de la carga de la fuente) genera una caída de tensión menor que el voltaje de barrera del diodo D_6, las entradas del amplificador operacional se polarizaran inversamente, con lo cual el diodo D_7 se polarizará inversamente, abriendo la línea que viene del arreglo Darlington.

2. Si la corriente en la carga aumenta a un punto en que la caída de voltaje generado en R_5 sea mayor que el voltaje de barrera del diodo D_6, entonces las entradas del operacional se polarizaran directamente, ocasionando que D_7 entre en conducción, robándole corriente a la base del arreglo Darlington, cortando la conducción de los transistores.

Por lo tanto el valor de la resistencia serie R_5 determina el valor máximo de la corriente que puede ser utilizada por la carga.

De esta manera el valor límite será cuando:

$$V_{bi} = I_{Lmax} R_3$$

4.3.3 Cálculos

Si se coloca un diodo de silicio y consideramos que $V_{bi} = .7\, Volts$.

Para una corriente máxima de 2 Amp.

$$R_3 = \frac{V_{bi}}{I_{Lmax}} = \frac{0.7}{5} = 0.35\Omega$$

El objetivo de la resistencia R_4 es limitar la corriente del diodo **D_6** cuando entre en conducción.

ISO 9001:2015 CERTIFIED

Considerando el caso más crítico que es cuando el voltaje de salida es máximo (30 Volts) Proponiendo una resistencia de 10 KΩ

$$I_6 = \frac{V_o}{R_4} = \frac{30}{10K} = 3\,mA$$

Valor que queda dentro del rango de trabajo del diodo.

4.4 INDICADOR DE SOBRECORRIENTE

4.4.1 Circuito

Finalmente el circuito de la fig 8 es otro comparador que nos permite visualizar cuando la fuente está sometida a una sobrecorriente

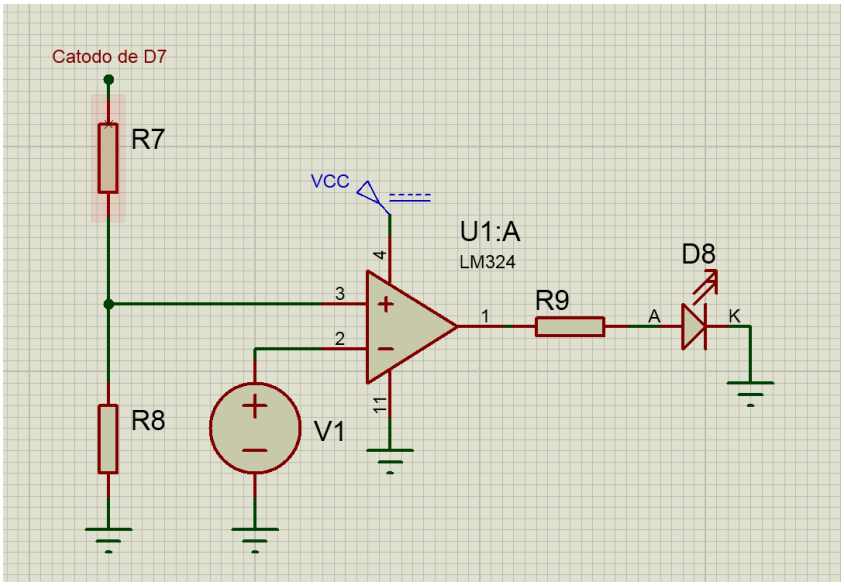


Fig 8 Circuito para el indicador de sobrecorriente

ISO 9001:2015 CERTIFIED

4.4.2 Funcionamiento

En este circuito, la fuente nos representa el voltaje de salida del sensor de corriente, que puede tener solo 2 posibles valores: 25 V o cero, que corresponden a los casos de polarización directa e inversa del circuito anterior, el cual se va a comparar contra el voltaje tomado del divisor de tensión, debiendo ser cualquier valor intermedio.

Los dos posibles casos que se presentaran son:

1. Si la corriente en la resistencia sensora (R_3) del circuito anterior está dentro el rango permitido, V_1 será de 25 V, polarizando inversamente las entradas del operacional, con lo cual la salida de este circuito será de 0 V y el LED no encenderá.
2. Si la corriente en la resistencia sensora del circuito anterior es mayor al valor máximo permitido, V_1 será de 0 V, polarizando directamente las entradas del operacional, con lo cual la salida de este circuito será de 25 V y el LED ahora encenderá, indicando la sobrecorriente.

4.4.3 Cálculos

Para el divisor de tensión, si deseamos fijar el voltaje de referencia en 20 V, los valores de las resistencias , los valores pueden ser 22 KΩ y 47 KΩ

$$V_o = V_i \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 30 \frac{47K}{22K + 47K} = 20$$

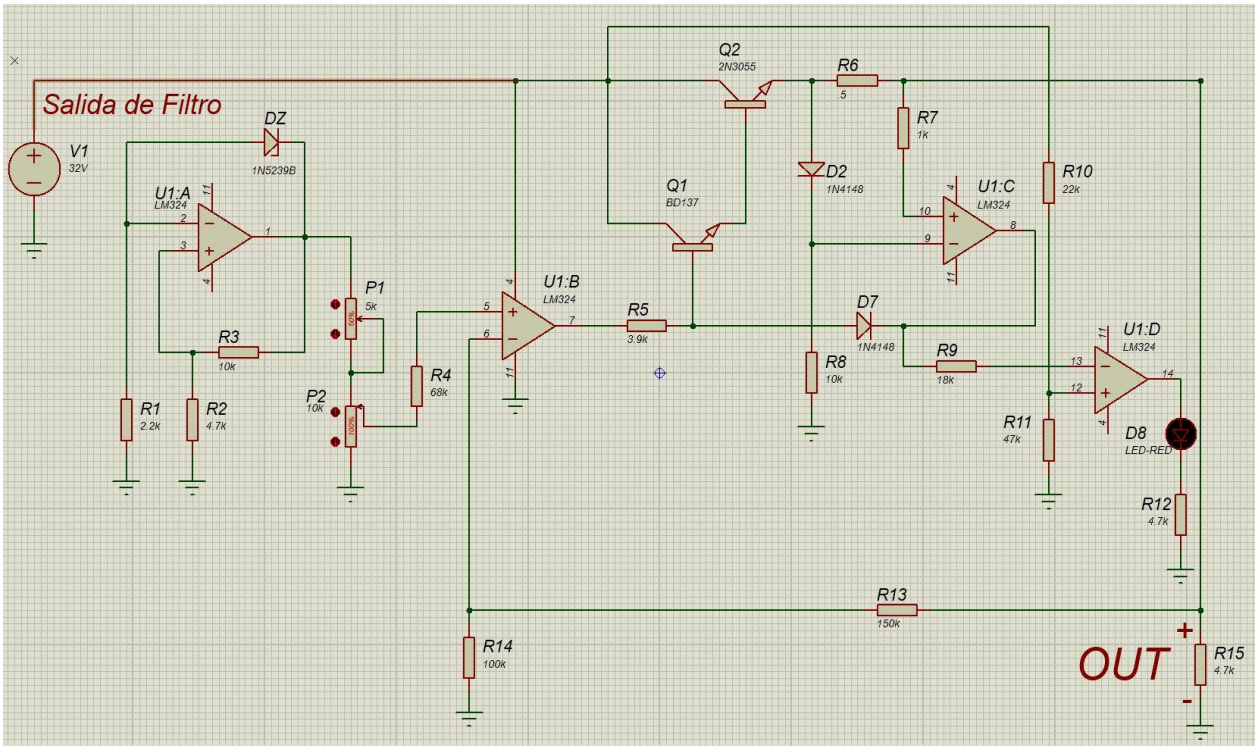
La función de R_9 es limitar la corriente del LED a un valor entre 10mA y 20mA, para tener una buena intensidad de luz, por lo tanto proponiendo una resistencia de $2.7K$, la corriente en el diodo será:

$$I_D = \frac{V_o}{R_9} = \frac{30}{2.7K} = 11\ mA$$

ISO 9001:2015 CERTIFIED

4.5 DIAGRAMA COMPLETO

Finalmente, uniendo todos los bloques anteriores tenemos el circuito final de la fuente, donde por cuestiones de espacio no se muestra el bloque del rectificador con filtro capacitivo, solo se deja indicado.



ISO 9001:2015
CERTIFIED

CAPITULO 5

PRUEBAS Y MEDICIONES FINALES

Como punto final, se mostrarán las mediciones que realizaron sobre la fuente ya terminada en cuanto a impedancia de entrada, voltaje de rizo sin carga y a plena carga, porcentaje de regulación para diferentes valores de voltaje de salida.

5.1 IMPEDANCIA DE SALIDA

Se sabe que para determinar la Impedancia de entrada:

$$Z_o = \frac{(V_{op} - V_{RL})}{I_{RL}}$$

$$Z_o = \frac{(22 - 21.91)}{1A} = 90\ m\Omega$$

5.2 CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO

La corriente máxima que se obtuvo sin que el voltaje de salida se bajara fue de 1.64 A, que está por encima de los requerimientos del diseño, que es de 1 A

5.3 PORCENTAJE DE REGULACIÓN

Se hicieron mediciones para diferentes voltajes, para circuito abierto y considerando plena carga

Vcc	sin carga	20.00 V	22.00V	25.00V
Vcc	Plena carga	19.89 V	21.86 V	24.84V
	%Regulación	0.55%	0.63%	0.64%

ISO 9001:2015 CERTIFIED

5.4 PORCENTAJE DE RIZO PARA DIFERENTES VOLTAJES

Vrizo	sin carga	40 mV	50 mV	60 mV
%rizo		0.20%	0.22%	0.24%
Vrizo	plena carga	60 mA	68 mV	75 mV
%rizo		0.30%	0.30%	0.30%

5.5 CONCLUSIONES

Con estos resultados se puede concluir que la fuente cumple con los requisitos que se establecieron al inicio del proyecto.

BIBLIOGRAFIA

Thomas L. Floyd., Basic Operational Amplifiers and Linear Integrated Circuits.,Prentice Hall.

Luces M Faulkenberry., Introducción a los amplificadores Operacionales con Aplicaciones a C. I. Lineales., Limusa Noriega

Marco Antonio Reyes Sanchez., Diseño de Circuitos con Transistores., Limusa

Milton Kaufman y Arthur H. Seidman., Manual para Ingenieros y Técnicos en Electrónica., Mc Graw Hill

Donald A. Neamen., Análisis y Diseño de Circuitos Electrónicos., Mc Graw Hill

Manuales de dispositivos de diferentes marcas

ISO 9001:2015 CERTIFIED

APENDICE A

LISTA DE COMPONENTES

	Componente	Cantidad
Tr	Transformador de 127 V a 24 V; de 2 Amp	1
Ca	Capacitor electrolitico de 2200 µf a 50 V	1
Amp	Amplificador Operacional LM 324 y base para el C.I.	1
D1aD4	Diodo rectificador 1N 4007	4
D5yD6	Diodo rectificador 1N 4148 o 1N4003	2
D7	Diodo Zener de 9.1 V de 1 Watt 1N5239B	1
D8	LED rojo y base para LED	1
Q1	Transistor BD 139	1
Q2	Transistor de potencia 2N 3055	1
R1	Resistor de película de carbón de 1/2 watt de 2.2 KΩ	1
R2	Resistor de película de carbón de 1/2 watt de 4.7 KΩ	1
R3	Resistor de película de carbón de 1/2 watt de 10 KΩ	1
R4	Resistor de película de carbón de 1/2 watt de 68 KΩ	1
R5	Resistor de película de carbón de 1/2 watt de 3.9 KΩ	1
R6	Resistor de película de carbón de 1/2 watt de 1.0 Ω	4
R7	Resistor de película de carbón de 1/2 watt de 1.0 KΩ	1
R8	Resistor de película de carbón de 1/2 watt de 10 KΩ	1
R9	Resistor de película de carbón de 1/2 watt de 18 KΩ	1
R10	Resistor de película de carbón de 1/2 watt de 22 KΩ	1
R11	Resistor de película de carbón de 1/2 watt de 47 KΩ	1
R12	Resistor de película de carbón de 1/2 watt de 4.7 KΩ	1
R13	Resistor de película de carbón de 1/2 watt de 150 KΩ	1
R14	Resistor de película de carbón de 1/2 watt de 100 KΩ	1
R15	Resistor de película de carbón de 1/2 watt de 4.7 KΩ	1
P1	Potenciómetro de película de carbón de 1/2 watt de 1 KΩ	1
P2	Potenciómetro de película de carbón de 1/2 watt de 10 KΩ	1
Di	Disipador de aluminio	1
	Gabinete metálico	1
	Switch para encendido 2p - 2t	1
	Jack rojo y Jack negro	2
	Tablilla para circuito impreso	1
	Cable para conexiones de varios colores	5
	botones para potenciómetros	2
	Aislantes para transistor de potencia	3

ISO 9001:2015 CERTIFIED

Aislante para sujetar circuito impreso	4
Vóltmetro - Ampérmetro digital	1
Soldadura 60 – 40	1
Cable para alimentación	1
Tornillos varios	20

APÉNDICE 2

IMÁGENES DEL PROCESO DE ARMADO

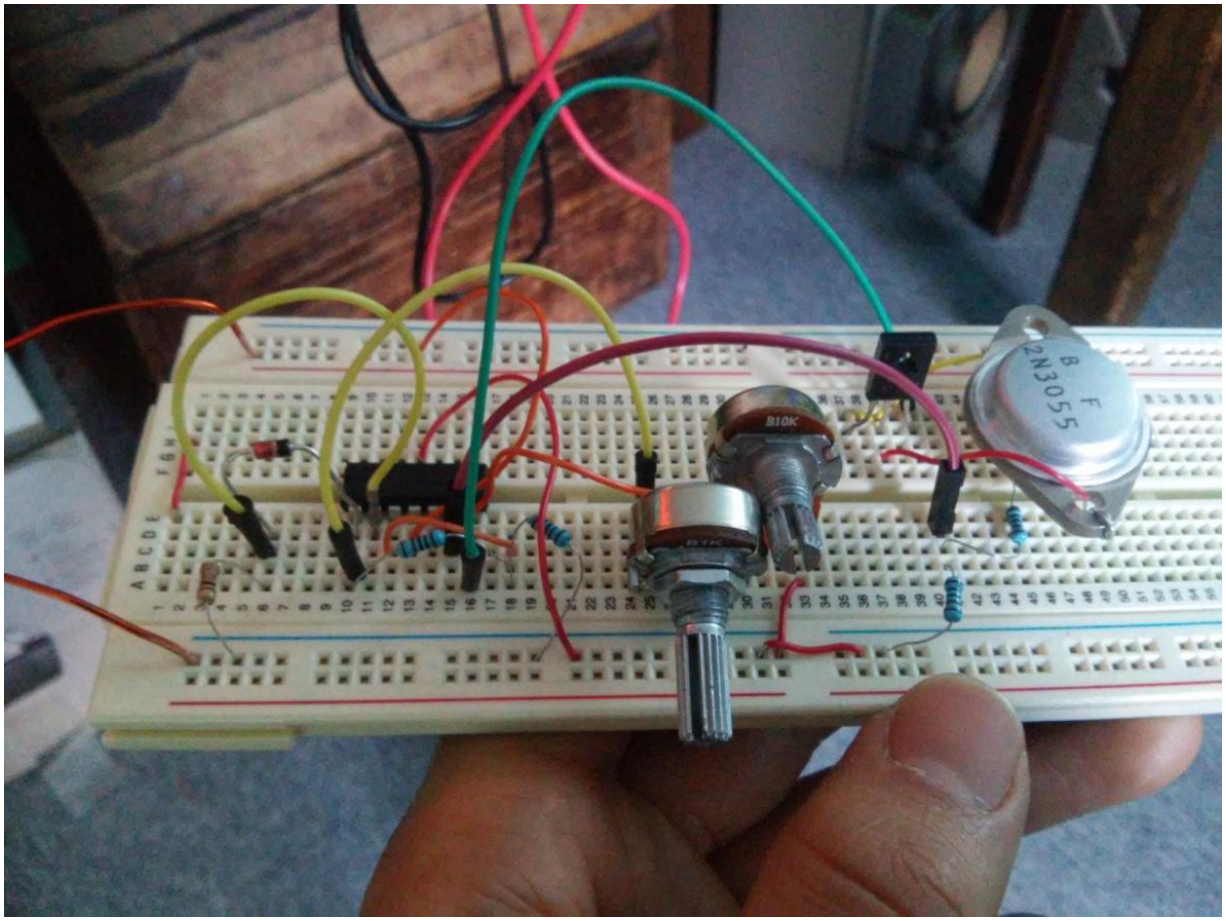
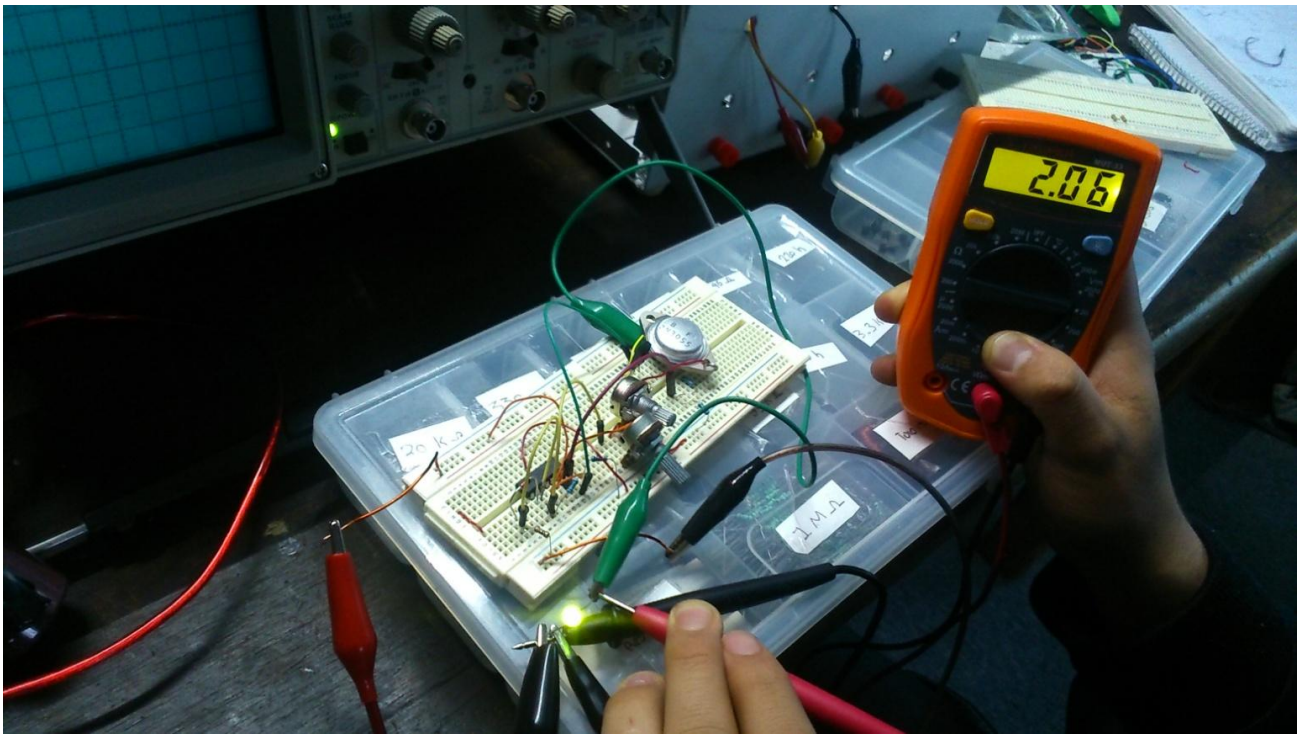
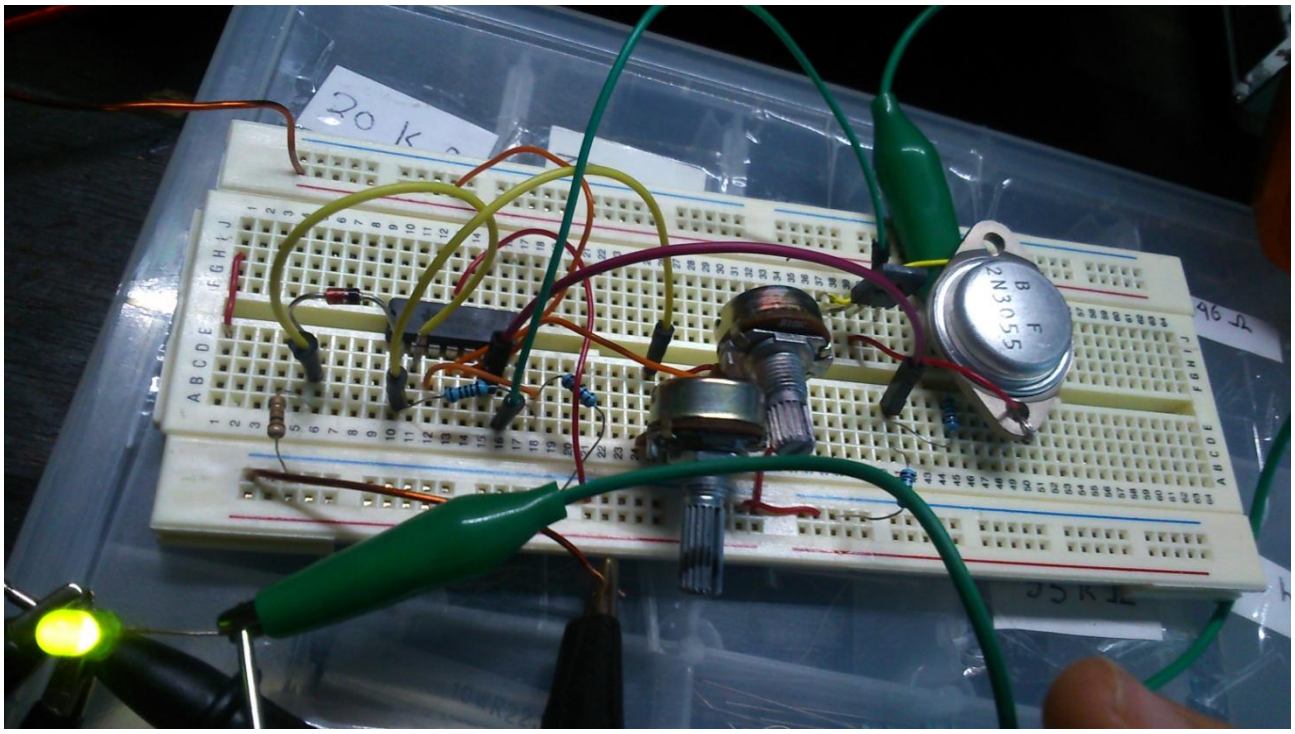


Foto 1 conexiones de los circuitos iniciales en tablilla protoboard

ISO 9001:2015
CERTIFIED





Fotos 2 y 3 Mediciones y pruebas preliminares en tablilla protoboard

ISO 9001:2015
CERTIFIED

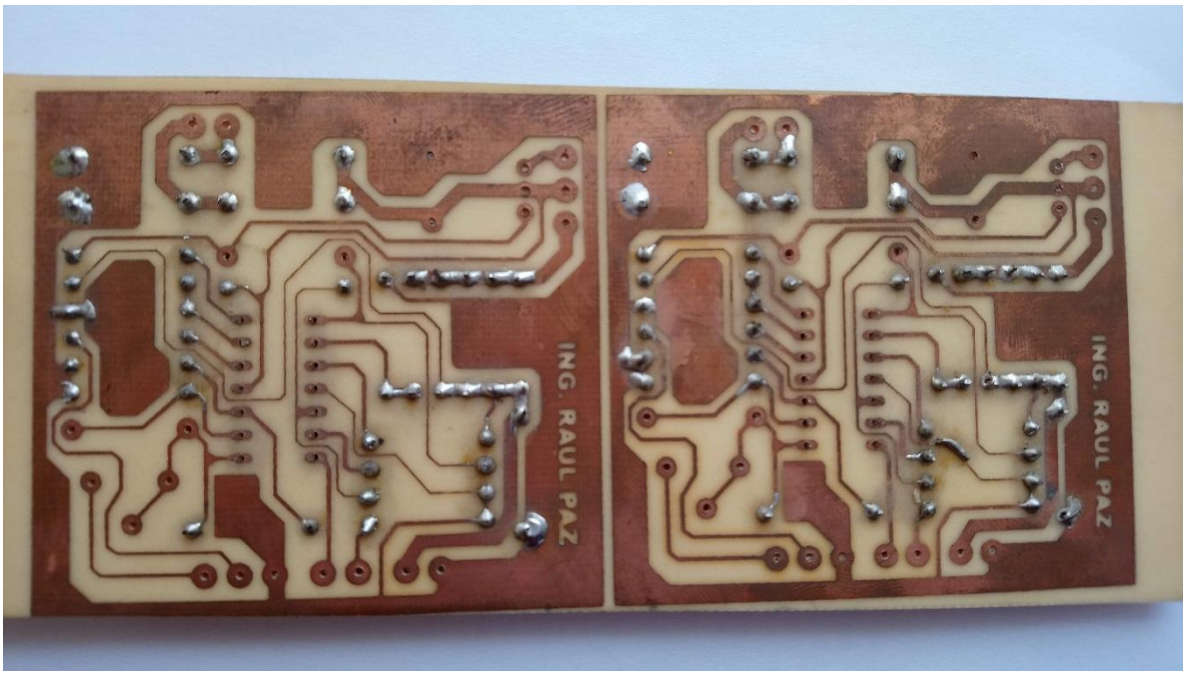


Foto 4 Circuito impreso de dos fuentes

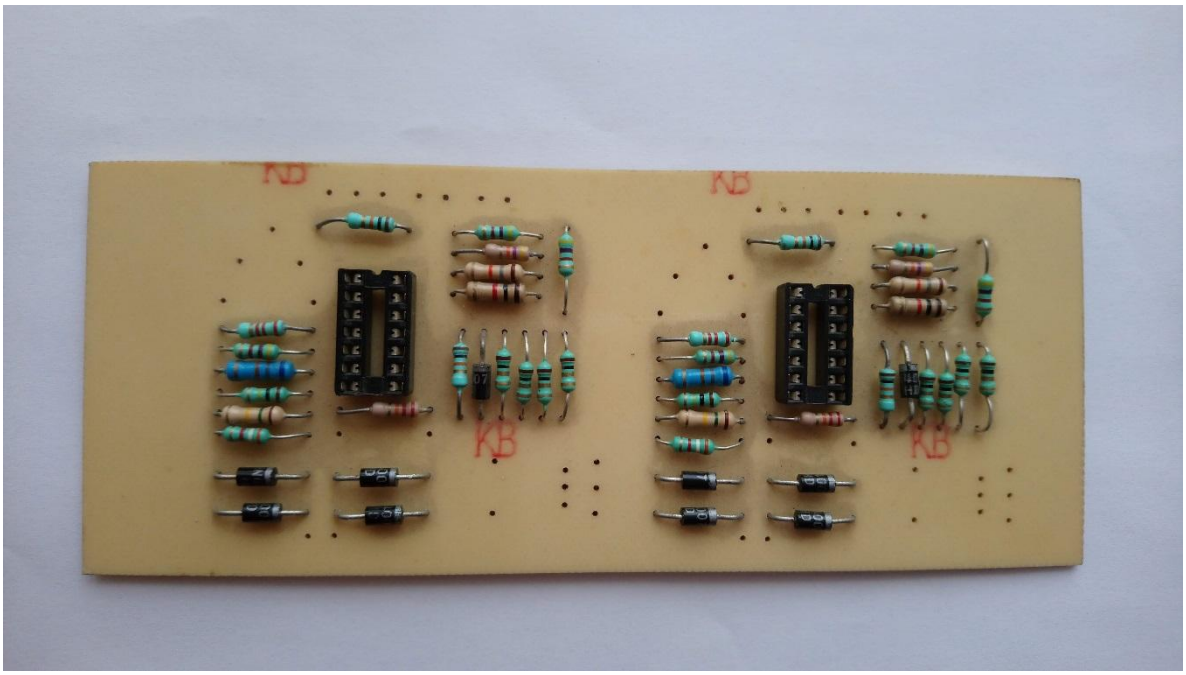


Foto 5 Vista superior de los algunos componentes montados en el circuito impreso

ISO 9001:2015 CERTIFIED

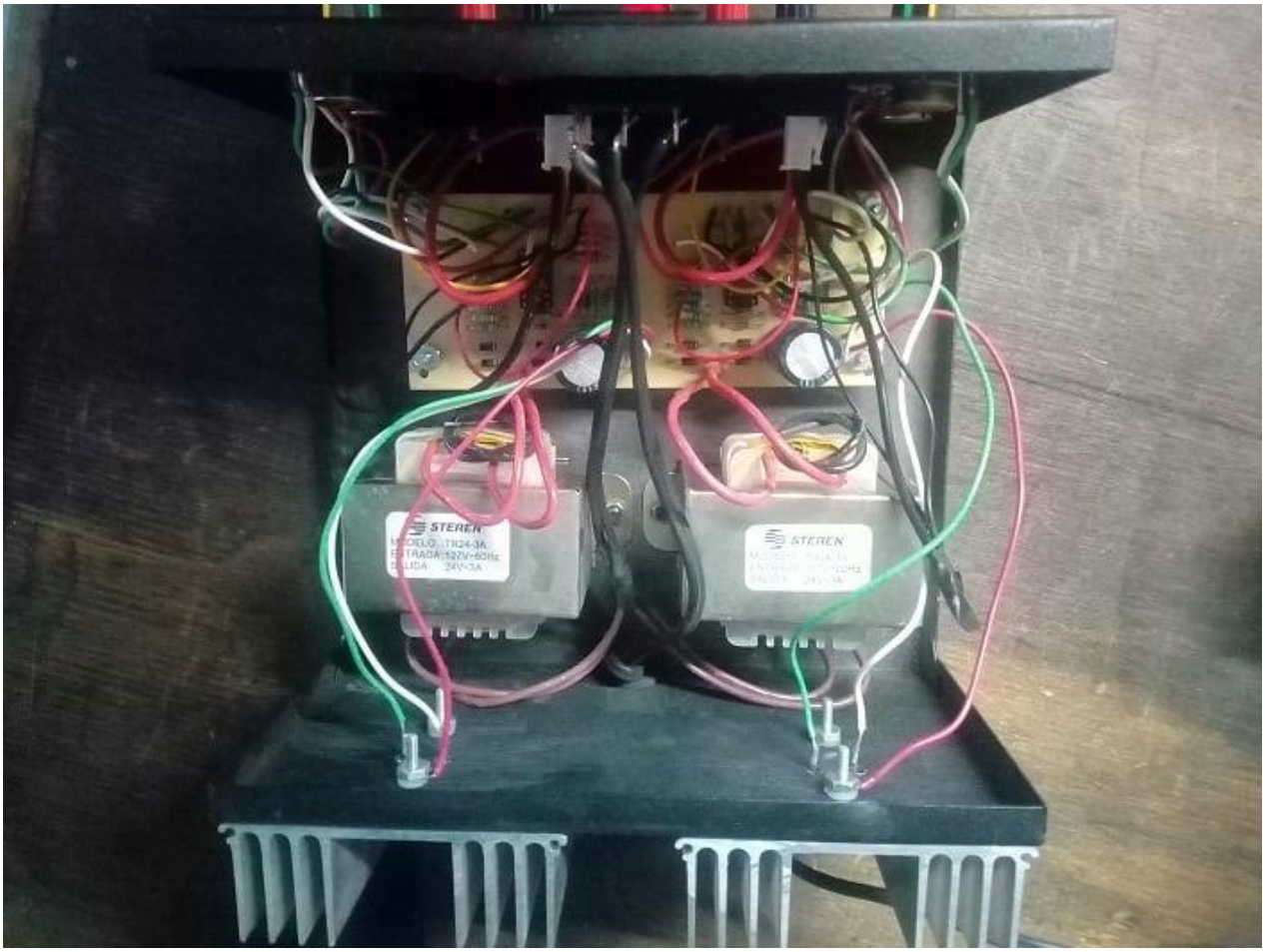


Foto 6. Conexiones de dos fuentes dentro del gabinete

ISO 9001:2015
CERTIFIED



Foto 7. Ubicación de los transistores de potencia montados en su disipador de calor

ISO 9001:2015
CERTIFIED



Foto 8. Vista frontal de dos fuentes terminadas en un gabinete.

Como una nota adicional se menciona que en cada gabinete se colocaron 2 fuentes de alimentación independientes dentro de un solo gabinete, con la finalidad de utilizarlas por separado o conectarlas como una fuente bipolar.

ISO 9001:2015 CERTIFIED