Práctica 3: Amplificador operacional II: Regulador lineal realizado con un operacional

1. Introducción.

En esta práctica se diseña un regulador de tensión de tipo serie y se realiza el montaje correspondiente con objeto de verificar su comportamiento. Aunque existen reguladores de tensión comerciales en forma de circuito integrado, en esta práctica se realiza un regulador que emplea un operacional y componentes discretos. Se ha elegido este circuito atendiendo a los criterios de sencillez y valor pedagógico.

Las características requeridas son:

- Tensión nominal de entrada: 20 V (suministrada por la fuente de alimentación del laboratorio).
- Tensión de salida ajustable dentro de un margen de 5 a 10 V (o algo mayor).
- Limitación de la corriente en la carga (I_{Lmax}) a 0,5 A aprox.

Para poder realizar medidas sobre la fuente bajo diferentes condiciones de carga, se precisa disponer de una *carga variable*. Lo más sencillo es utilizar un reostato (resistor variable) de potencia. Sin embargo, los reostatos se dañan fácilmente cuando se ajustan cerca del valor 0, debido al paso de corrientes elevadas. Además, una vez ajustado un valor de resistencia de carga, cualquier cambio en la tensión de salida de la fuente se traduce en un cambio de corriente en la carga.

Por todo lo anterior, en esta práctica se ha optado por emplear un generador de corriente como carga activa. El apartado siguiente se dedica a su descripción.

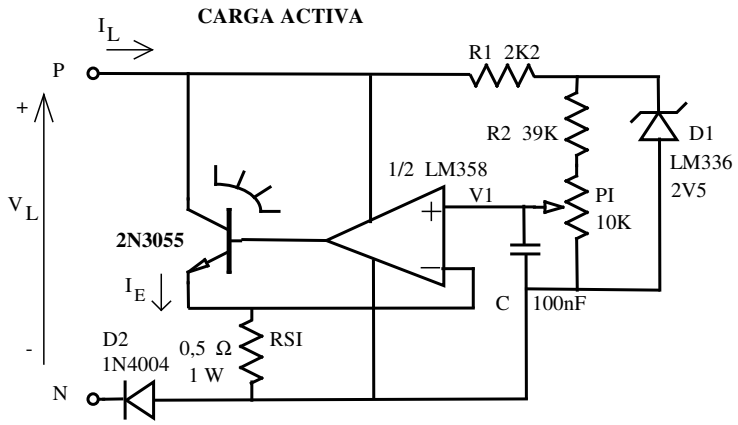
2. Carga activa.

2.1. Descripción.

Se precisa realizar un generador de corriente cuyo valor sea ajustable entre 0 y 1 A. El valor de la corriente no debería variar sensiblemente aunque cambie la tensión aplicada, por lo menos en el margen de 5 a 10V (en el que va a funcionar el regulador de tensión). Además, el circuito debe disponer solamente de 2 terminales de conexión al exterior (P,N). Por lo tanto no puede tener conexiones de alimentación adicionales. El circuito operará con una única polaridad de corriente I_L (de P a N).

El circuito empleado se muestra en la página siguiente.

En primer lugar, se obtiene una tensión estabilizada a partir de la tensión V_L aplicada entre P y N. En lugar de un zéner común, se emplea el circuito integrado LM336 (D_1) que actúa como un zéner de 2,5 V con resistencia dinámica muy baja y buena estabilidad térmica. De esta forma, los 2,5 V se mantienen casi sin variación aunque la tensión V_L varíe entre 5 y 10V. La resistencia R_1 polariza al LM336.



El divisor ajustable formado por R_2 y P_I permite obtener una tensión V_1 variable entre 0 y 0,5 V aproximadamente. El condensador de 100 nF ayuda a reducir posibles señales interferentes de frecuencias altas.

La tensión V_1 se convierte en una corriente mediante el bloque formado por el operacional, el transistor y la resistencia R_{SI} que actúa como sensora de corriente. Si ambas entradas del operacional se encuentran a la misma tensión, y se desprecia la corriente de polarización de la entrada inversora:

$I_E = I_{RSI} = V_1 / R_{SI} = 2 \cdot V_1$

Como V_1 se puede ajustar entre 0 y 0,5 V, I_E se podrá ajustar entre 0 y 1 A.

La corriente I_L es:

$I_L = I_C + I_{op} + I_{R1}$

A su vez, la corriente Iop consumida por el operacional está formada por la que su salida entrega a la base (I_B) y la que se deriva internamente a masa, siendo esta última despreciable. Por lo tanto:

$I_L = I_C + I_B + I_{R1} = I_E + I_{R1}$

La corriente I_{R1} es:

$I_{R1} = (V_L - 2,5 - 0,7) / R_1$, en donde los 0,7 V representan la caída en el diodo D_2 (V_{D2}).

I_{R1} está acotada entre:

$I_{R1} = 3,1$ mA (para $V_L = 10$V)

$I_{R1} = 0,82$ mA (para $V_L = 5$V)

Por lo tanto, I_L es aproximadamente igual a I_E, al menos para intensidades por encima de 50 mA. La existencia de unos mA de diferencia se manifiesta con la imposibilidad de ajustar I_L a cero. Aunque se ajuste el potenciómetro para una tensión $V_1 = 0$, I_L no descenderá a 0, sinó que se mantendrá a un mínimo entre 3,1 y 0,82 mA. La existencia de la corriente I_{R1} también afecta a la dependencia de I_L con V_L. Por ejemplo, si I_L está ajustada a 100 mA con $V_L = 5$V, aumentará a 102,28 mA si V_L sube a 10V.

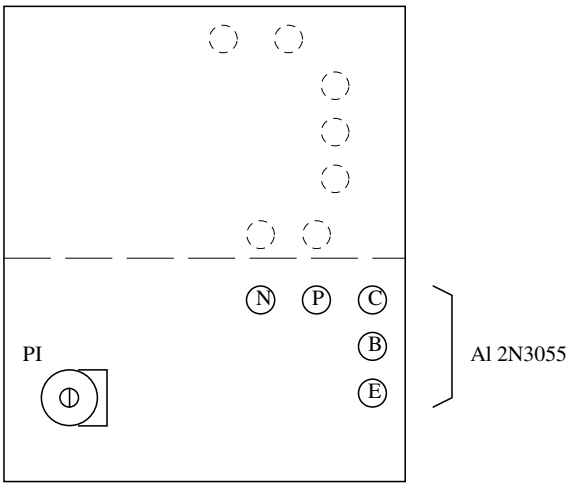
Los errores citados carecen de importancia en esta aplicación, ya que el circuito se emplea como carga activa para probar un regulador de tensión, y los ensayos se realizarán bien en vacío (carga desconectada) bien con corrientes superiores a 50 mA.

El diodo D_2 protege al circuito de un eventual error en la polaridad de la tensión aplicada en V_L.

La elección del operacional LM358 se debe a su capacidad para operar con tensiones de alimentación muy bajas, del orden de 3,5 V. Se debe tener en cuenta que la tensión de alimentación del operacional es en este circuito igual a V_L - V_{D2}. El LM358 contiene 2 operacionales iguales. En esta aplicación solamente se utiliza uno.

2.2. Medidas.

La figura representa la tarjeta utilizada en esta práctica. Para completar el circuito de la carga activa es preciso conectar un transistor externo del tipo 2N3055, de la forma indicada. En este apartado se emplea solamente la parte inferior de la placa (carga activa).



Ajustar la fuente de alimentación del laboratorio a 5V y su limitador de corriente al valor máximo. Ajustar el potenciómetro PI al mínimo (a tope en sentido anti-reloj). Conectar el negativo de la fuente del laboratorio a la borna N y el positivo a la borna P. De esta forma, la carga activa queda conectada a la fuente del laboratorio. Medir la corriente entregada a la carga, empleando el amperímetro incorporado en la fuente. El valor debe ser prácticamente cero. En caso contrario apagar la fuente y avisar al profesor.

Repetir la medida con el potenciómetro PI al máximo. Esta medida debe realizarse en unos pocos segundos y volver el potenciómetro al mínimo. De esta forma se evita un posible sobrecalentamiento del transistor 2N3055.

Ajustar el potenciómetro para obtener una corriente de 100 mA. Elevar la tensión de la fuente a 10V y observar si el valor de la corriente se ve afectado.

3. Diseño del regulador.

Los circuitos reguladores de tensión tienen como misión mantener la tensión de salida lo más inalterable posible frente a variaciones de:

a) La tensión de entrada (estabilización).

b) La corriente consumida por la carga (regulación).

Los reguladores simples que utilizan una resistencia y un diodo zener presentan varios inconvenientes:

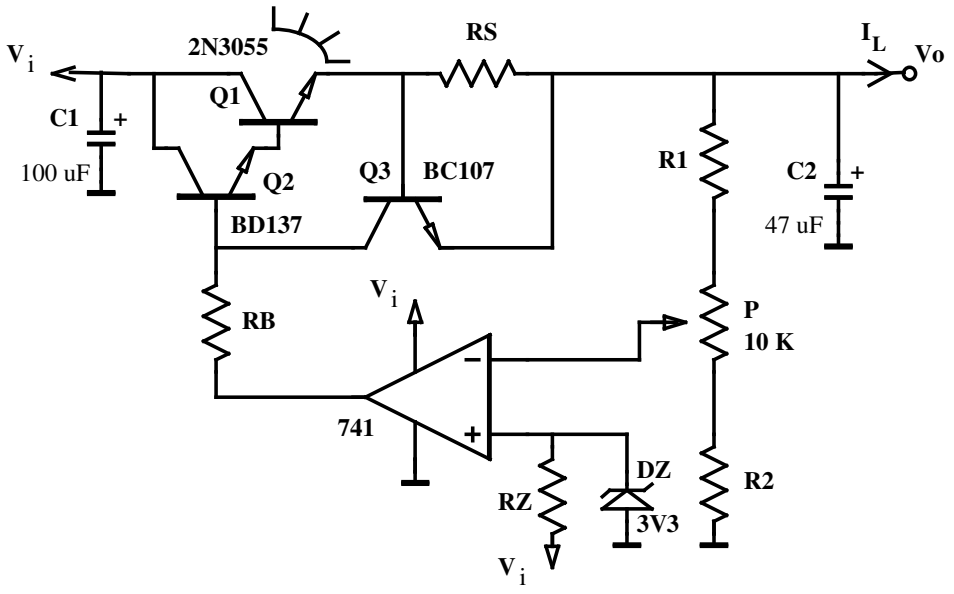
1) Por ser reguladores de tipo paralelo, el consumo se mantiene siempre al valor máximo permitido. Cuando la carga reduce su consumo, el zener aumenta el suyo en la misma cantidad.

2) Para consumos elevados, el zener utilizado debe ser de gran potencia. Los zeners de potencias elevadas son más caros y regulan peor que los de pequeña potencia.

3) La estabilización y regulación obtenidas no son suficientes para muchas aplicaciones.

Para evitar estos problemas, es conveniente emplear un regulador serie que utilice como elemento de paso un dispositivo activo, generalmente un transistor bipolar o MOS de potencia. Este tipo de regulador necesita a su vez una tensión de referencia estable que puede ser proporcionada por un regulador simple de baja potencia.

La figura muestra el circuito elegido para esta práctica. Las tres conexiones rotuladas como Vi, están conectadas a una única fuente de alimentación del laboratorio, ajustada a 20 V.



Para un primer análisis, se supone que Q3 no está presente y que $R_B = R_S = 0$. El circuito puede ser considerado como un amplificador realimentado de acoplo directo (continua). Desde este punto de vista, la entrada al amplificador es la tensión en la entrada no inversora del operacional, de aproximadamente 3,3 V, sumninistrados por el regulador R_Z-D_Z.

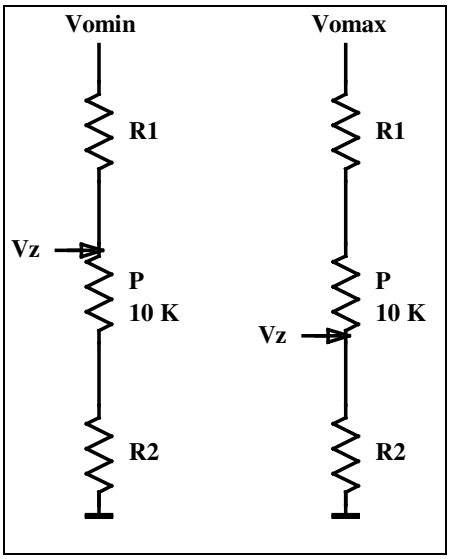
La salida del operacional se conecta a un montaje Darlington con una fuerte ganancia en corriente (del orden del producto de las betas de ambos transistores, aprox. 8000). La corriente entregada a la carga es aproximadamente igual a la de emisor de Q1, con lo que para entregar 0,5 A, la corriente de salida del operacional es del orden de 0,5/8000 ≈ 62 μA, muy por debajo del máximo que puede entregar (unos 20 mA).

La salida del circuito es la salida del Darlington (terminal marcado Vo), en donde la red formada por R_1, P y R_2 realiza un muestreo de esta tensión, y cierra el bucle de realimentación mediante la conexión a la entrada inversora del operacional.

3.1. Cálculo de la red R_1, P, R_2.

Por lo tanto, mientras el operacional no se satura, se puede suponer que en la entrada inversora hay también 3,3 V. Esto permite determinar los valores de R_1 y R_2 necesarios para obtener el margen de 5 a 10 V solicitado. Para poder despreciar la corriente de la entrada inversora del operacional (aprox. 200 nA), la corriente que circula por P debe ser varios órdenes de magnitud superior. Al mismo tiempo, un valor muy pequeño de P supone derivar una corriente innecesariamente grande por R_1, P y R_2. Por eso es recomendable utilizar un potenciómetro de 10 K, aunque cualquier valor entre 5 K y 100 K podría ser adecuado.

Los valores de R_1 y R_2 se determinan mediante los circuitos que corresponden a las posiciones extremas del potenciómetro:



$V_z / (P+R_2) = V_{omin} / (R_1+P+R_2)$

$Vz / R_2 = V_{omax} / (R_1+P+R_2)$

$(P+R_2) / R_2 = V_{omax} / V_{omin}$

$P / R_2 = V_{omax} / V_{omin} - 1$

$R_2 = P / (V_{omax} / V_{omin} - 1)$

$R_1 = (V_{omax} \cdot R_2) \cdot (1/V_z - 1/ V_{omin})$

Para ajustar entre 4,5 y 10,5 V (margen solicitado ampliado), se tiene:

$R_2 = 10 / 1{,}33 = 7{,}5$ k ; $R_1 = 6{,}36$ k.

Se toman los valores disponibles más próximos, por ejemplo:

R_1= 6K8 ; R_2= 8K2.

3.2. Cálculo de R_Z.

La resistencia R_Z se utiliza para polarizar el diodo D_Z en la zona de ruptura. Los diodos de pequeña potencia (del orden de 0,5 W máximo) deben polarizarse con una corriente mínima del orden de unos 5 mA para obtener una resistencia dinámica baja. Por otra parte, carece de sentido hacer disipar en el diodo una potencia mayor de la necesaria, aunque éste pueda soportarla. Por lo tanto, optamos por elegir R_Z para obtener una corriente del orden de 6 mA.

$R_Z = (20 - 3{,}3) / 6 = 2{,}78$ K

Se toma el valor normalizado R_Z= 2K7. Las potencias disipadas en el diodo y la resistencia son:

$P_D = 3{,}3 \cdot 6 = 19{,}8$ mW ; $P_R = 16{,}7 \cdot 6 = 100$ mW.

3.3. Cálculo de R_S y R_B

El estudio realizado hasta el momento, no incluía las resistencias R_S y R_B, ni el transistor Q_3. Estos componentes se utilizan para proteger la fuente (y la propia carga) de una corriente excesiva en la carga. Sin estos elementos, un cortocircuito el la salida provocaría una corriente de emisor de Q_1 de:

$I_E = (\beta_1+1)(\beta_2+1)\cdot I_{opmax} \approx 8000 \cdot 20$ mA = 160 A.

En el montaje de esta práctica, la fuente del laboratorio limitaría la corriente a un valor no superior a 1 A, pero si el circuito se alimentara directamente con la salida de un rectificador + filtro (aplicación real), los transistores Q_1 y/o Q_2 se destruirían.

La protección interna que posee el operacional resulta insuficiente dada la elevada ganancia en corriente del par Q_1-Q_2. Por lo tanto se hace necesario un circuito específico de protección. El circuito elegido actúa de la siguiente forma.

Mientras la corriente de emisor de Q_1 no alcanza un cierto valor, la caída de tensión en R_S no es suficiente para polarizar en activa a Q_3, con lo que este transistor se mantiene en corte, con una corriente de colector I_{C3} muy pequeña ($I_{C3corte} < 10$ µA). El transistor Q_3 casi no afecta al funcionamiento del regulador. En la resistencia R_B se produce una caída de tensión menor que:

$V_{RBmax} = R_B \cdot (I_{B2max} + I_{C3cortemax}) \approx R_B \cdot 72$ µA

La tensión en la base de Q2 debe poder alcanzar el valor:

$V_{B2} = V_{omax} + V_{BE3} + V_{BE1} + V_{BE2} = 10{,}5 + 2{,}1 = 12{,}6$ V

y la salida del operacional no es capaz de superar Vcc-2V, es decir, unos 18 V. Por lo tanto, VRB2 debe estar por debajo de 18 - 12,6 = 5,4 V. Esto permite acotar el valor máximo utilizable en R_B.

$R_{Bmax} = 5{,}4\text{V} / 72\mu\text{A} = 75$ K.

Cuando la corriente de emisor de Q_1 alcanza un valor:

$I_{E1max} = V_{BE3umbral} / R_S$

el transistor Q_3 entra en zona activa y la corriente de colector crece rápidamente. Esta corriente provoca una apreciable caída de tensión en la resistencia R_B, con lo que la tensión en la base de Q_2 se reduce. Al descender V_{B2}, desciende la tensión V_{E1} y la de salida Vo. El operacional detecta la caída de la tensión de salida. Debido a la realimentación, la tensión en la salida del operacional aumenta para intentar mantener Vo al valor de regulación.

Esta contienda entre el transistor Q_3 y el operacional debería terminar con el dominio del transitor, para que la limitación de corriente sea efectiva. El operacional se satura positivamente (a unos 18 ó 19 V), pero la corriente I_{C3} hace caer en R_B la tensión necesaria para mantener V_{B2} al valor necesario para que I_{E1} no supere el máximo permitido. El valor mínimo de V_{B2} corresponde a un cortocircuito de la salida y es aproximadamente $V_{B2} = 2{,}1$ V.

La corriente en la carga es (si se desprecia la que circula por R_1):

$I_L = I_{E1} + I_{C3}$.

por lo que la limitación de I_{E1} a 0,5 A, limita I_L a un valor algo superior. Es normal realizar el diseño de forma que $I_{C3} << I_{E1}$. Si se toma 50 veces menor, I_{C3max} = 10 mA. Este valor debe ser suficiente para provocar en R_B una caída de 19 - 2,1= 16,9 V (peor caso).

R_{Bmin} = 16,9V / 10 mA = 1,69 K.

Se toma un valor para R_B de 2K2, aunque cualquier valor entre éste y 22 K podría ser adecuado.

El valor de R_S se determina mediante:

$R_S= V_{BE3umbral} / I_{E1max}$ = 0,5V / 0,5A = 1 Ω.

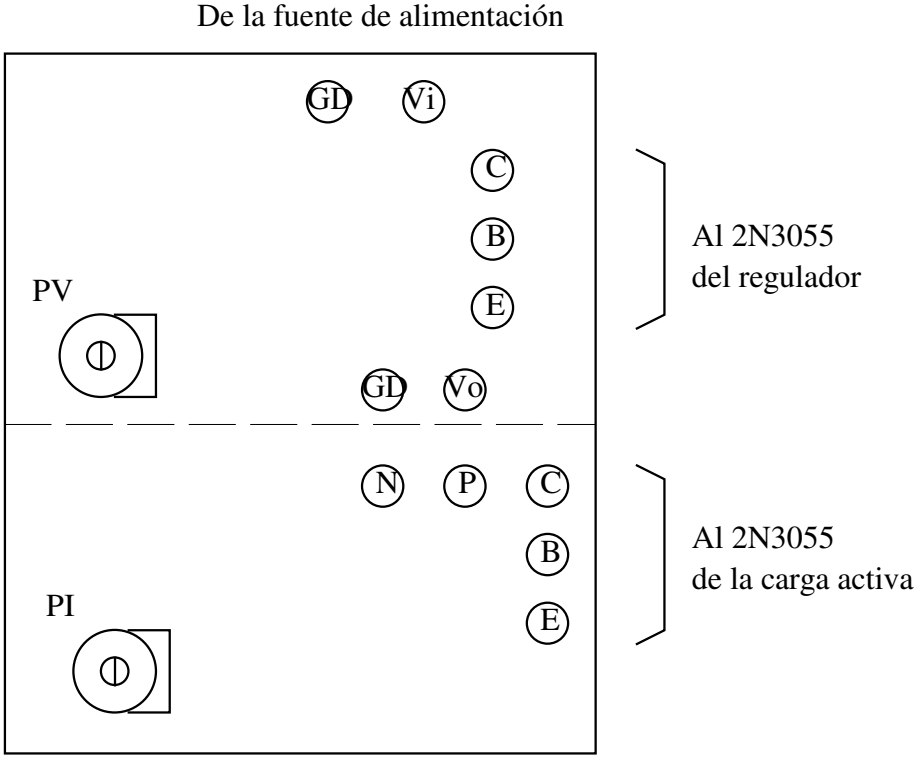
La potencia máxima disipada en RS es de aproximadamente:

$P_{RS}= V_{BE3max}^{\ 2} / R_S = 0,6^2 / 1 = 0,36$ W.

por lo que debe utilizarse una resistencia de al menos 1/2 W.

4. Montaje del regulador y medidas a realizar.

La figura representa la tarjeta utilizada en esta práctica. Para completar los circuitos es preciso conectar 2 transistores externos del tipo 2N3055, de la forma indicada (uno ya estará conectado de apartados anteriores). No existe ninguna conexión entre el bloque superior (regulador) y el inferior (carga) a través de la placa de circuito impreso.



Para los siguientes apartados la fuente del laboratorio debe conectarse a la entrada del regulador (positivo a Vi y negativo a GD).

Para que la carga activa quede conectada a la fuente se debe unir la salida GD del regulador a la entrada N de la carga y la salida Vo del regulador a la entrada P de la carga.

Con el fin de evitar que los transistores 2N3055 se calienten en exceso, es conveniente realizar las medidas que utilicen consumos elevados de la carga, durante un tiempo razonablemente corto (unos 20 s máximo).

Comenzar con la fuente del laboratorio ajustada a 20 V y con su limitación de corriente al valor máximo.

4.1. Margen de tensiones de salida.

Determinar el margen de tensiones de salida que se obtiene ajustando PV. Hacer esta medida con una corriente en la carga de 0,1 A (ajustada mediante PI).

4.2. Característica tensión/corriente.

Determinar la característica Vo= f(I_L). Para ello se debe ajustar previamente la tensión de salida Vo a 5V en vacío (carga activa desconectada). A continuación se realizan medidas de Vo con la carga conectada y valores de I_L de 100mA a 500mA en incrementos de 100 mA. Se debe anotar también el valor de I_L que hace descender la tensión Vo a 4,5 V. Finalmente se determina la corriente de cortocircuito. Para ello se desconecta la carga activa y se realiza una conexión directa de Vo a masa durante unos segundos. Esta última medida puede realizarse de forma indirecta midiendo la caída de tensión en R_S. Finalmente se deben emplear las medidas anteriores para representar gráficamente la curva Vo= f(I_L).

4.3. Rendimiento y resistencia de salida.

Determinar el rendimiento del regulador definido como:

$\eta = P_L/P_i$.

siendo P_L la potencia máxima que puede entregar a la carga (sin que actúe la limitación de corriente) y P_i la que consume de V_i en estas condiciones. Es decir:

P_L = VLmax · ILmax (sin que actúe la limitación)

$P_i = V_i \quad I_i$ (la corriente Ii se puede medir con el amperímetro incorporado en la fuente del laboratorio).

Determinar la resistencia dinámica de salida definida como:

$R_o = \Delta V_o / \Delta I_L$

en la zona en que no entra en funcionamiento el mecanismo de limitación de corriente. Hacer la medida partiendo de V_o= 10 V, I_L= 0, y midiendo V_o para I_L= 0,1 A.

4.4. Factor de estabilización y mínima tensión de entrada.

Determinar el factor de estabilización (o regulación de línea) definido como:

F.E.= $(\Delta V_o / V_o) / (\Delta V_i / V_i)$

Para hacer las medidas, ajustar V_i a 20 V y V_o a 10V. Ajustar I_L a 0,1 A. Aumentar V_i a 22 V y determinar el nuevo valor de V_o.

Ajustar nuevamente V_i a 20 y V_o a 10 V. Ajustar I_L a 0,2 A. Medir la tensión en el zéner V_{z1} (entrada no inversora del operacional 741). Reducir paulatinamente Vi hasta alcanzar un valor V_{imin} tal que la salida haya descendido a 9,5 V. Medir nuevamente la tensión en el zéner V_{z2}. Razonar qué elementos del circuito son responsables de la reducción de tensión en V_o que se produce al descender V_i.