

APUNTE ELECTRÓNICA

REGULADORES DE TENSIÓN.-

ASIGNATURA : ELECTRÓNICA I I .-

CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

2001.-

DIODO ZENER.-

Si un diodo semiconductor se polariza en forma inversa, circula por el una corriente muy pequeña, (del orden de los micro Amperes.).-

Si la tensión inversa se hace lo suficientemente grande , se alcanza un punto en que la corriente inversa crece muy rápidamente con un leve aumento de la tensión, quedando limitada solo por la impedancia del circuito que polariza el diodo.-

Si esta corriente inversa alcanza un valor elevado, debido al exceso de calor producido en la juntura, este diodo se destruye.-

Si la corriente inversa fluyera inversamente a través del área de la juntura, el diodo podría manejar corrientes mayores.-

Pero en los diodos de junturas comunes esto no sucede.-

La ruptura ocurre en uno o dos lugares en donde la densidad de corriente , y el calor producido es mayor.-

Por lo general el resultado es el mismo , el diodo se destruye.-

Utilizando técnicas especiales , las cuales permiten producir un flujo de corriente uniforme a través del área de la juntura se construyen los denominados

DIODOS ZENER.-

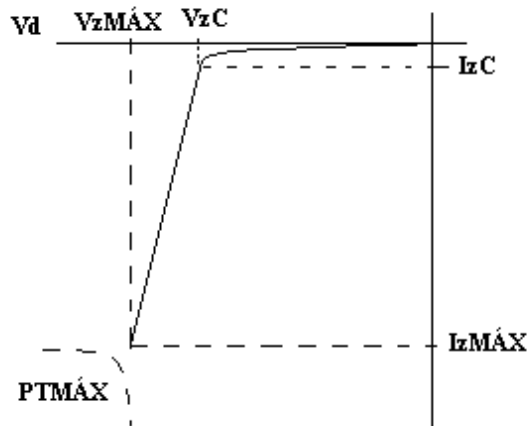
Este tipo de diodo sí opera dentro de un rango nominal con polarización inversa y puede soportar corrientes inversas relativamente grandes sin destruirse.-

Si la tensión inversa se reduce , o suprime , bajo el valor de ruptura, la juntura se

restaura a un estado origina.-

Los diodos zener son rectificadores de silicio especialmente diseñados para trabajar en su zona inversa.-

Presentan una tensión de ruptura que es fija y que permanece relativamente constante dentro de un amplio rango de variación en la corriente inversa.-



V_{zC} = TENSIÓN CRÍTICA.-

I_{zC} = CORRIENTE ZENER CRÍTICA.-

$V_{zMÁX}$ = TENSIÓN ZENER MÁXIMA.-

$I_{zMÁX}$ = CORRIENTE ZENER MÁXIMA.-

$P_{TMÁX}$ = POTENCIA DE DISIPACIÓN MÁX.

CURVA CARCTERÍSTICA DEL DIODO ZENER.-

Al observar la curva característica del diodo zener , en la región de ruptura la tensión a través del diodo permanece relativamente constante, para cambios apreciables de corriente .-

Por esta razón el **diodo zener** se puede utilizar como regulador o estabilizador de tensión.-

El estado de tensión constante del diodo zener depende de su construcción , lo que permite un rango amplio en tensión regulada , aproximadamente entre 2 volts y 200 volts , y potencias de disipación que pueden ir sobre los 50 watts.-

a tensión de ruptura de los diodos zener depende de la temperatura .-

La manera de cómo varía la tensión zener con la temperatura , depende del tipo de

Ruptura que ocurre con la tensión inversa.-

Los diodos zener que regulan tensión bajo los 6 Volts, presentan un tipo de ruptura denominado **RUPTURA POR EFECTO ZENER.**-

Este tipo de ruptura se caracteriza porque AL aumento la temperatura , disminuye la tensión inversa a la cual ocurre la ruptura. (COEFICIENTE TÉRMICO DE TENSIÓN DE RUPTURA NEGATIVO.-)

Los diodos zener que se fabrican para trabajar sobre los 6 Volts. De tensión de ruptura , el fenómeno que ocurre se denomina **RUPTURA POR AVALANCHA.**-

Este tipo de ruptura se caracteriza , porque un aumento de la temperatura , produce Un aumento de la tensión inversa a la cual ocurre la ruptura. (COEFICIENTE TÉRMICO DE TENSIÓN DE RUPTURA POSITIVO).-

SIMBOLOGÍA DEL DIODO ZENER.-

Para un buen funcionamiento del diodo zener , según las indicaciones dadas por el fabricante , si la corriente inversa se mantiene dentro de los limites indicados de seguridad , el diodo no tendría que sufrir daños volviendo a su estado normal.-

Si por el contrario se aumenta la corriente mas allá del limite de seguridad , el diodo sufrirá un daño permanente debido a que la energía es tan alta que es capaz de arrancar átomos enteros del material, destruyendo en forma inmediata la juntura y por ende el diodo.-

REGULADOR BÁSICO CON DIODO ZENER

Como los diodos zener presentan una zona de ruptura típica a una determinada tensión inversa (V_z) .-

Si se utiliza esta propiedad que corresponde a una fuente ideal de voltaje para entregar una tensión constante o estabilizada a una carga que presenta como característica un consumo variable, para su funcionamiento.-

También este dispositivo debe resguardar las posibles fluctuaciones o variaciones de

la tensión ondulatoria residual de entrada. –

CIRCUITO REGULADOR BÁSICO CON DIODO ZENER

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL CIRCUITO. –

1. – $V_i = V_s + V_z + (I_T \times R_s) + V_z$. –

2. – $V_s = I_T \times R_s$. –

3. – $I_T = I_z + I_L$. –

4. – $V_i = R_s \times (I_z + I_L) + V_z$. –

5. – $V_z = I_L \times R_L$. –

$V_i - V_z$

6. – $I_T = \frac{V_i - V_z}{R_s}$. –

RS

Al analizar el circuito regulador de tensión con diodo zener , la tensión en la carga permanece aproximadamente constante , igual a la tensión nominal del diodo zener V_z , aunque varíe la tensión de entrada V_i o la corriente a través de la resistencia de carga R_L , sobre un rango amplio . –

Si V_z es constante , el valor de I_L depende exclusivamente del valor de R_L . –

Para el caso en que I_T se mantenga constante , si I_L aumenta , I_z debe disminuir de modo que siempre se cumpla que $I_T = I_z + I_L$. –

Por otro lado si I_L disminuye , I_z debe aumentar , para el caso que todavía I_T sea constante. –

El caso más desfavorable para el Zener sería cuando $I_L = 0$ ya que $I_T = I_z$ y la potencia que debería disipar el zener sería máxima. –

Por otra parte si la corriente I_L se aproxima o se iguala con I_T , la corriente I_z se hace muy pequeña , pudiendo sacar al diodo zener de la tensión de ruptura o de regulación dejando de operar este. –

Para el caso anterior , las variaciones de la corriente zener I_z pueden ser tal

que el diodo deje de operar , o que circule excesiva corriente a través de el y se destruya. –

Para este efecto se determina una corriente Máxima ($I_{M\acute{a}x}$) que mantiene la tensión zener sin destruir el diodo , con la cual se puede calcular la potencia máxima. –

También se determina una corriente Mínima ($I_{M\acute{i}n}$) para mantener la tensión zener. –

Resumiendo una fuente de tensión , estabilizadora puede ser afectada por la demanda de corriente ($0 < I_L < I_{M\acute{a}x}$) o por la variación de la tensión de entrada ($V_i \cdot M\acute{i}n. < V_i < V_i \cdot M\acute{a}x.$) , las que afectan la fuente de forma extrema de dos formas :

1.– La fuente deja de regular. –

2.– Queman el diodo zener. –

Naturalmente que al especificar el tipo de fuente , se conoce la corriente de carga máxima, ($I_L \cdot M\acute{a}x$) , como también se puede especificar la tensión de entrada V_i con su rango de variación. –

Esto nos permite determinar el valor de R_s , (resistencia que asume las variaciones de tensión de entrada) , de manera tal que cumpla con el criterio de :

1.– Mantener la regulación de tensión en el peor de los casos. –

2.– Especificar requisitos que debe cumplir el diodo zener . –

Por tanto la condición que debe cumplir el circuito para que exista regulación en las condiciones más críticas ($I_L \cdot M\acute{a}x.$) ($V_i \cdot M\acute{i}n$) es que permita pasar una corriente total I_T tal que mantenga el diodo zener regulando. –

Esto se especifica de la siguiente forma. :

$V_i \cdot M\acute{i}n. - V_z$

$I_T = \text{-----} " (I_z \cdot M\acute{i}n. + I_L \cdot m\acute{a}x) . -$

R_s

Es decir el valor de R_s está determinado por :

$$V_i. \text{ Máx.} - V_z$$

$$R_s = \frac{V_i. \text{ Máx.} - V_z}{I_z. \text{ Mín.} + I_L. \text{ Máx.}}$$

$$I_z. \text{ Mín.} + I_L. \text{ Máx.}$$

Por otra parte , la condición que debe cumplir el circuito para que el diodo zener no se quemara cuando se tienen las condiciones críticas que afectan a este , $I_L = 0$ y

$V_i = \text{Máx.}$, es que la corriente total I_T sea menor o igual a la corriente máxima que soporta el diodo ($I_z. \text{ Máx.}$) .-

Lo cual se especifica de la siguiente forma :

$$V_i. \text{ Máx.} - V_z$$

$$I_T = \frac{V_i. \text{ Máx.} - V_z}{R_s} < I_z. \text{ Máx.}$$

$$R_s$$

Por tanto la resistencia R_s será :

$$V_i. \text{ Máx.} - V_z$$

$$R_s = \frac{V_i. \text{ Máx.} - V_z}{I_z. \text{ Mín.} + I_L. \text{ Máx.}}$$

$$I_z. \text{ Máx.}$$

EJEMPLOS :

Para el circuito de la figura , determinar los parámetros eléctricos necesarios , en base a los siguientes datos :

DATOS : $I_L. \text{ Máx.} = 450 \text{ mA.}$; $V_i = 20 \text{ Volts.}$; variación de V_i 10 % .-

$V_L = 12 \text{ Volts.}$; $I_z. \text{ Mín.} = 5 \% \text{ de } I_L. \text{ Máx.}$.-

DESARROLLO :

1.- Calculo del porcentaje de variación de V_i :

$$20 \times 10 / 100 = 2 \text{ Volts.}$$

$$V_i. \text{ Máx} = 20 + 2 \text{ ! } V_i. \text{ Máx} = 22 \text{ V.}$$

$$V_i. \text{ Mín.} = 20 - 2 \text{ ! } V_i. \text{ Mín.} = 18 \text{ V.}$$

La tensión de entrada varía entre 18 V y 20 V.-

2.- Determinación de la tensión zener :

Como la carga se encuentra en paralelo con el diodo zener, la tensión zener será :

$$V_z = V_L ! V_z = 12 \text{ V.}-$$

3.-Calculo de R_s , partiendo del criterio de regulación en las peores condiciones :

$$18 - 12$$

$$R_s = \frac{0,45 + 0,023}{0,473} = 12,7 \text{ } \Omega \text{ ! } R_s = 12,7 \text{ } \Omega \text{ .-}$$

$$0,45 + 0,023 \text{ } 0,473$$

4.- Calculo de I_z . Máx. :

$$V_i \text{ Máx.} - V_z \text{ } 22 - 12$$

$$I_z \text{ Máx.} = \frac{10}{12,7} = 787 \text{ mA ! } I_z \text{ Máx} = 787 \text{ mA}$$

$$R_s \text{ } 12,7$$

5.- Calculo de la potencia máxima de disipación del diodo zener :

$$P_z \text{ Máx.} = V_z \times I_z \text{ Máx.} = 12 \times 0,79 \text{ ! } P_z \text{ Máx} = 9.48 \text{ W.}-$$

Con esta potencia máxima calculada del diodo zener, es conveniente incrementar la potencia de la resistencia **R_s y del diodo zener en un 20 %** , por tanto :

$$P_z = 12 \text{ Watts.}-$$

6.- Calculo de la potencia máxima de la resistencia R_s :

$$(V_i \text{ Máx} - V_z) \text{ } (22 - 12)$$

$$P_s \text{ Máx.} = \frac{10^2}{12,7} = 787 \text{ mW ! } P_s \text{ Máx} = 787 \text{ mW.}-$$

$$R_s \text{ } 12,7$$

Características entregadas por el fabricante en un manual. :

CODIGO	COD. ECG.	T.REGULADA	I.NOMINAL	P.MÁXIMA	FIGURA-	TOLERANCIA	I.MÁXIMA
M5.6Z1.-	5011T1.-	5,6 VOLTS.	20 mA.-	500 mW.	Z4.-	5 %-	89 mA.
MZ10T5.-	5019T1.-	10 VOLTS.	20 mA.-	500 mW.-	Z4.-	5 %-	50 mA.-

REGULADORES DE TENSIÓN TRANSISTORIZADOS.-

REGULADOR DE TENSIÓN PARALELO:

La característica de disipación de potencia para el caso de los diodos zener es muy pequeña , lo que implica que estos componentes se fabrican para baja potencia. –

Cuando se requiere manejar potencia mayores, se utilizan otros componente circuitales, tales como transistores que conectado en paralelo con la carga nos lleva al REGULADOR DE TENSION PARALELO. –

REGULADOR PARALELO. –

Analizando las características eléctricas del circuito se tiene :

1. – $V_L = V_{CE}$. –

2. – $V_L = V_{CB} + V_{BE}$. –

3. – $V_L = V_Z + V_{BE}$. –

4. – $V_i = R_i \times (I_z + I_c + I_L) + V_Z + V_{BE}$. –

5. – $I_i = I_Z + I_c + I_L$. –

6. – $V_i = (R_i \times I_i) + V_Z + V_{BE}$. –

V_L

7. – $I_L = \text{-----}$. –

R_i

8. – $I_z = I_B + I_R$. –

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO:

Al analizar el circuito de la figura , este opera en forma muy similar al regulador zener, con la única diferencia que la corriente de carga es pequeña ya que la corriente de colector es controlada por la corriente de base. –

Cuando la tensión de entrada tiende a aumentar , esto genera un incremento en la corriente zener , lo cual aumenta la corriente I_R , aumentando el voltaje V_{BE} que incrementa la corriente de base I_B y por tanto a su vez aumenta la corriente I_C . –

Al provocarse un aumento de la corriente I_C , aumenta la caída de tensión en R_i absorbiendo el incremento de tensión de la fuente y manteniendo constante la tensión en la carga. –

Si la tensión de entrada disminuye , la corriente de base I_B también disminuye por efecto de disminuir la corriente zener. –

Con esto se provoca una disminución también en la corriente de colector I_C y por lo tanto esto provoca una menor caída de tensión en R_i , manteniendo con esto constante la tensión en la carga. –

EJEMPLO :

Diseñar un regulador de tensión Paralelo para obtener una tensión de salida en la carga de **12V**, con corrientes de carga de **85 mA a 200 mA**. –

Considerar que la tensión de entrada **varía entre 20 V y 17 V**, también se **cuenta con una tensión zener de 11,3 V** , mientras que el **$V_{BE} = 0,7 V$** . –

Como dato se nos entrega que, la suma de las corrientes (**$I_z \text{ mín.} + I_c \text{ mín.}$**) **corresponde al 10 % de la corriente de carga máx ($I_L \text{ Máx.}$)**. –

Por tanto **$I_z \text{ mín.} + I_c \text{ mín.} = 0,1 \times I_L \text{ Máx.}$** ! **$I_z \text{ mín.} + I_c \text{ mín.} = 0,1 \times 0,2 = 20 \text{ mA}$** . –

1. – Calculo de la resistencia que asume las variaciones de tensión R_i . –

$V_i \text{ mín.} = R_i \times (I_z \text{ mí.} + I_c \text{ mín.} + I_L \text{ máx.}) + V_z + V_{BE}$. –

Se despeja de esta ecuación de entrada la resistencia R_i . –

$V_i \text{ mín.} - (V_z + V_{BE})$

$R_i = \text{-----}$

$(I_z \text{ mín.} + I_c \text{ mín.} + I_L \text{ máx.})$

$17 - (11,3 + 0,7)$

$R_i = \text{-----} = \text{-----} ! R_i = 22,7$

$(0,02 + 0,2)$

Por otro lado con la ecuación del voltaje de entrada , podemos determinar las corrientes :

$$V_i \text{ Máx.} = R_i \times (I_z \text{ máx.} + I_c \text{ máx.} + I_L \text{ mín}) + V_z + V_{BE} .-$$

despejando:

$$V_i \text{ máx.} - (V_z + V_{BE})$$

$$I_z \text{ máx.} + I_c \text{ máx} = \text{-----} - I_L \text{ mín} .-$$

$$R_i$$

$$20 - 12$$

$$I_z \text{ máx.} + I_c \text{ máx} = \text{-----} - 0,085 ! I_z \text{ máx} + I_c \text{ máx} = 267,4 \text{ mA}$$

$$22,7$$

Para la suma de estas corrientes , aproximadamente el 10 % de esta suma se distribuye por el diodo zener y el 90 % corresponde a la corriente de colector IC.-

Por tanto $I_z \text{ máx}$ corresponde a : 26,74 mA. Mientras que la corriente

$I_c \text{ máx.}$ corresponde a : 240,66 mA.-

Al igual que se distribuyó la corriente total ($I_z \text{ máx.} + I_c \text{ máx.}$) en un 10 % , de la misma manera se distribuye la corriente por la base .-

Por tan to el 10% de $I_z \text{ máx.}$ corresponde a la corriente de base y el resto a la corriente que circula por la resistencia (R).-

Por tanto : **$I_B = 10 \%$ de 26,74 mA ! $I_B = 2,67 \text{ mA.}$** -

La corriente por la resistenci (R) será : $I_R = 24,1 \text{ mA.}$ -

De esta forma se pueden determina el valor de **R** :

$$V_{BE} 0,7$$

$$R = \text{-----} = \text{-----} ! R = 29 .-$$

$$I_R 0,0241$$

Al conocer algunas características eléctricas del circuito , se puede

seleccionar el diodo zener a utilizar y el transistor, calculando la potencia del zener y el beta (β) del transistor.-

Por tanto la potencia del Zener será : $P_z = I_z \text{ máx.} \times V_z$

$P_z = 0,02674 \times 11,3$! **$P_z = 300 \text{ mW.}$** -

$I_c \text{ máx } 0,24066$

El Beta del transistor tendrá un valor de $\beta = \text{-----} = \text{-----}$

$I_B 0,00267$

$\beta = 90.$ -

DIODO ZENER SELECCIONADO ! $V_Z = 11,3 \text{ V.}$ -

$P_Z = 300 \text{ mW.}$ -

$I_Z \text{ máx} = 26,74 \text{ mA.}$ -

TRANSISTOR SELECCIONADO ! $\beta = 90.$ -

$I_C \text{ máx} = 240,66 \text{ mA.}$ -

$V_{CE} = \text{superior a } 12 \text{ v.}$ -

CIRCUITO REGULADOR DE TENSIÓN PARALELO DISEÑADO.-

_____XXXXXXXXXXXXXX_____

REGULADOR DE TENSIÓN BÁSICO SERIE :

ANÁLISIS FUNCIONAL.-

El más utilizado de los de los reguladores de tensión , es el regulador tipo serie.-

El transistor es la etapa de control y R_L es la carga.-

El diodo zener alimentado a través de R y del transistor y su corriente de base , suministra una tensión constante de referencia aplicada al base del transistor.-

Al aumentar la corriente consumida por la carga I_L , por cualquier razón , la tensión V_L sube e incrementa el valor de V_{BE} llevando el emisor a un potencial

más positivo con respecto a base .-

Por tanto la polaridad directa base – emisor se reduce y la corriente de colector disminuye, disminuyendo así la corriente de carga I_L .-

Se ve que a un aumento de la corriente I_L , corresponde un efecto de control que disminuye el valor de I_L .-

Existe entonces un efecto de compensación o de regulación.-

El circuito detector de error , en este regulador , actúa por la característica base – emisor del circuito, y el mismo transistor hace las veces de amplificador.-

Este circuito dividido en bloques, presenta : **etapa de control** ;

etapa de muestreo ; detector de error ; amplificador de error

CIRCUITO EN BLOQUE DE UN REGULADOR SERIE.-

El circuito de control , generalmente es un transistor con colector común o emisor común.-

El circuito de referencia de tensión requiere de una fuente constante actuando como tensión de referencia , que para este caso es un diodo zener.-

El amplificador , es un bloque que también lo realiza el mismo transistor y amplifica lo que se conoce como tensión de error , donde dicha tensión controla la base del transistor y lo hace conducir más o menos .-

Para este caso el transistor de control , asume las variaciones de tensión que se pueden provocar por la tensión de línea o por el consumo de corriente de la carga.-

La regulación lograda por este circuito es pobre y se puede incrementar aumentando la ganancia del amplificador de error o realimentando el circuito.-

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL CIRCUITO BÁSICO

DEL REGULADOS TRANSISTORIZADO SERIE.-

1.- $V_i = V_{CB} + V_z$.-

2.- $V_i = (I_R \times R) + V_z$.-

3.- $V_L = V_z - V_{BE}$.-

4.- $V_i = V_{CE} + V_L$.-

5.- $I_i = I_R + I_C$.-

6.- $I_i = I_R + I_L$.-

7.- $I_L = I_C = I_E$.-

9.- $I_R = I_B + I_z$.-

EJEMPLO DE DISEÑO:

Para el circuito de la figura , determine los parámetros eléctricos del circuito, seleccione que diodo zener se debe utilizar y que transistor, basado en los siguientes Datos :

DATOS : $V_i = 28 \text{ V}$.- ; $V_z = 18,65 \text{ V}$.- : $V_{BE} = 0,65 \text{ V}$.- : $\beta = 120$.- : $R_L = 20 \text{ } \Omega$.- : $R = 470 \text{ } \Omega$.-

DESARROLLO :

REGULADOR DE TENSIÓN SERIE REALIMENTADO.-

Una fuente de tensión regulada , utiliza normalmente un circuito automático de control, que detecta , prácticamente de un modo instantáneo las variaciones de tensión y las corrige automáticamente .-

En general un sistema de control requiere de las siguientes etapas :

1.- ETAPA DE REFERENCIA :

Para determinar si una magnitud ha variado se precisa de una referencia , que deberá ser lo más estable posible .- (batería , diodo zener.) .-

2.- ETAPA DE MUESTREO :

Su misión es detectar las variaciones de tensión que se producen en la salida .- (divisor de tensión.-) .-

3.- ETAPA COMPARADORA:

Su finalidad es comparar , en todo momento , las tensiones de referencia con las de muestra , que pretendemos controlar .-

(amplificador operacional , amplificador diferencial.-).-

4.- ETAPA AMPLIFICADORA DE ERROR :

La tensión de error que no es más que la diferencia entre la muestra y la referencia , puede presentar un nivel de tensión pequeño que no sea capaz de accionar la etapa de control.-

En este caso se debe de amplificar.- (amplificador transistorizado.-)

5.- ETAPA DE CONTROL :

Como su nombre lo indica controla las variaciones de tensión , contrarresta las variaciones producidas en la salida .- (transistor en zona lineal .-).-

Asume las variaciones de tensión producidas por efecto de la carga o por efecto de la línea o red.-

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO :

Una fracción de la tensión de salida % V_o , es comparada con la tensión de referencia V_r .-

si la tensión de muestra V_m es igual a la tensión de referencia V_r la etapa de control no actúa.-

Si la tensión de muestra V_m es menor que la tensión de referencia V_r , el elemento de control debe reducir su caída de tensión en sus extremos.-

Si la tensión de muestra V_m es mayor que la tensión de referencia V_r , la caída de tensión en el elemento de control ha de aumentar .-

CIRCUITO EN BLOQUE DEL REGULADOR DE TENSIÓN

REALIMENTADO.-

ETAPA DE MUESTRA :

La etapa de muestra , suele ser por lo general un simple divisor de tensión

Resistivo , con un pequeño ajuste , conectado en la salida de la fuente .-

Se ha de procurar que la corriente que consume esta etapa sea mucho menor

que la consumida por la carga, con el fin de que la tensión de muestra **V_m** sea proporcional a **V_o**.–

CIRCITO DE MUESTRA. –

Por tanto la tensión de muestra se encuentra determinada por :

$$(1 - \frac{R_2}{R_1 + R_2}) \times V_o$$

$$V_m = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_o$$

ETAPA DE REFERENCIA :

La etapa de referencia proporciona una tensión constante **V_r** para un amplio margen de corriente .–

Por lo general, esta etapa se encuentra compuesta por un diodo Zener , conectado al comparador de tensión y alimentado por un divisor resistivo.–

CIRCUITO DE REFERENCIA .–

Dentro del circuito de referencia , ha de procurarse que $I_2 \gg I_c$.–

Las variaciones de tensión de salida , afectan a la tensión de referencia de la siguiente forma :

$$V_o = I_2 \times R_2 + V_r .-$$

$$V_o = I_2 \times R_2 + V_r .-$$

$$\text{Pero : } V_r = r_z \times I_2 .-$$

Reemplazando se tiene :

$$\frac{V_o}{R_2} = \frac{V_r}{r_z} .-$$

$$V_o = \frac{V_r R_2}{r_z} + V_r$$

Por tanto es conveniente , que la resistencia del Zener (**r_z**) sea lo más pequeña posible , es decir que **r_z = 0** lo cual implica que **V_r = V_z** independiente de **I_z**.

ETAPA COMPARADORA :

La señal de salida en la etapa comparadora , ha de ser proporcional a la discrepancia entre la tensión de la etapa de muestra V_m , y la tensión de la etapa de referencia V_r .–

CIRCUITO COMPARADOR .–

Para el circuito de la figura , si la tensión de salida V_o aumenta , también aumenta la tensión V_{BE} , lo que implica que la corriente de colector I_C será mayor. –

Por tanto la tensión de salida estará dada por :