

## DISIPACION DE POTENCIA EN LOS DIODOS

Cuando los diodos de potencias deban trabajar en circuitos eléctricos con formas de ondas senoidales con frecuencias comprendidas entre 50 y 400 [Hz], las pérdidas de potencia inversa y directa, determinan principalmente; la disipación total, constituyendo las directas la parte más importante. No obstante las pérdidas inversas es necesario en ocasiones tenerlas en cuenta, por que aumentan con la temperatura y la frecuencia de trabajo; lo que puede producir un funcionamiento inestable.

La potencia eléctrica real perdida en los diodos, y que debe ser disipada por los mismos, sin que se alteren sus características, dependen de los valores instantaneos de corriente que por ellos circulan y en correspondencia con ellos de los valores instantaneos de las caidas de tensiones que se producen entre sus terminales (Anodo y Catodo).

$$p_i = i_D \cdot v_D$$

Donde :

$p_i$  : Potencia instantanea.  
 $i_D$  : Corriente instantanea.  
 $v_D$  : Tensión instantanea.

La potencia media perdida en un período de la corriente alterna, será :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p_i \cdot dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_D \cdot v_D \cdot d\omega t \quad (1)$$

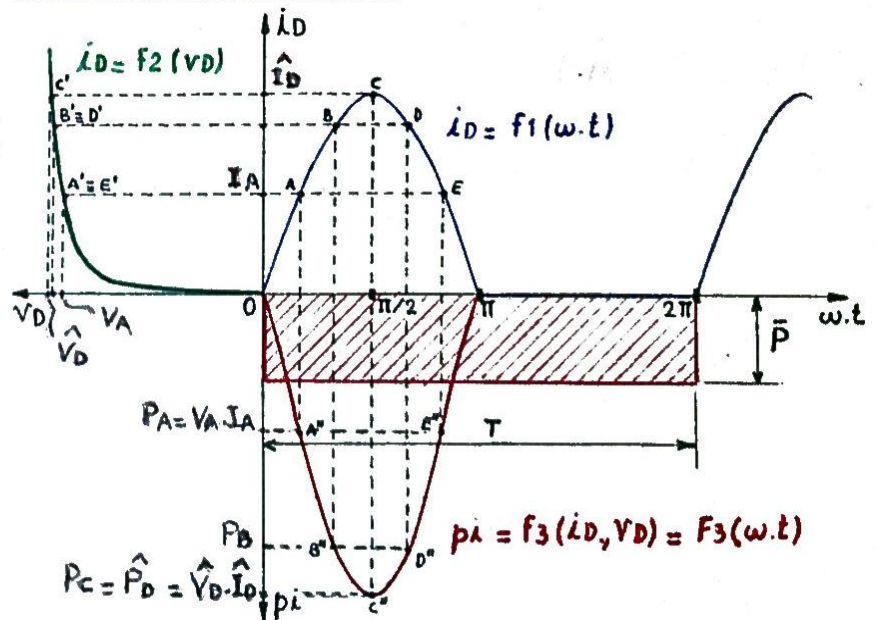
La relación entre los valores instantaneos de la corriente que circula por el diodo y la caída de tensión que esta produce se puede establecer de la características directas Tensión-Corriente del dispositivo a la temperatura de trabajo.

Debido a que estas caracts. no son lineales; varios son los métodos para obtener la potencia perdida en un ciclo de trabajo.

### METODO GRAFOANALITICO

En el primer cuadrante del sistema de coordenadas se representa la corriente que circula por el diodo en función del tiempo; en el segundo cuadrante la característica Tensión - Corriente del dispositivo. Con los valores instantaneos de  $i$  y  $v$  se representa en el cuarto cuadrante, los valores instantaneos de la potencia en función del tiempo, dada por el producto ( $v_D \cdot i_D$ ).

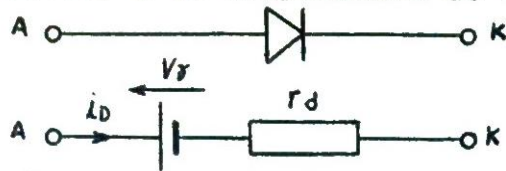
El área limitada por esta curva y el eje de las abscisas, determina la energía eléctrica total convertida en calor en un período. La altura del rectángulo tramado, de base igual al período es la potencia media perdida que debe disipar el diodo (el área de este rectángulo debe ser igual al área delimitada por  $p_i$  y el eje de las abscisas).



### METODO DE REPRESENTACION DEL DIODO CON UN CIRCUITO LINEAL POR TRAMOS

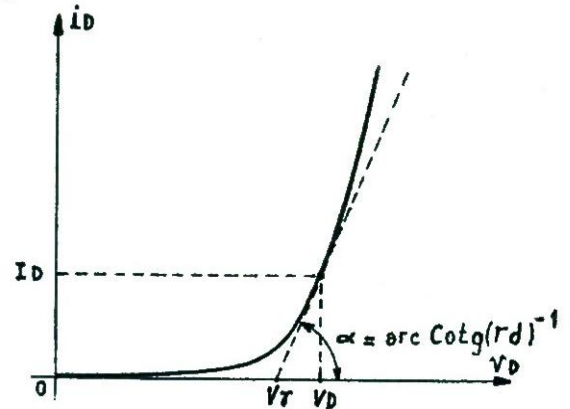
Otra forma aproximada para determinar la potencia media directa perdida en los diodos, consiste en reemplazarlos por un circuito equi-

valente lineal obtenido a partir de la curva de Tensión-Corriente del dispositivo a la temperatura de trabajo.



$$\begin{cases} p_i = V_T \cdot i_D + r_d \cdot i_D^2 \\ i_D = \overline{I_D} + i_d \end{cases}$$

$$p_i = V_T \cdot (\overline{I_D} + i_d) + r_d \cdot i_D^2$$



$$\overline{P} = \frac{1}{T} \int_0^T V_T \cdot (\overline{I_D} + i_d) \cdot d(\omega t) + \frac{1}{T} \int_0^T r_d \cdot i_D^2 \cdot d(\omega t)$$

$$\overline{P} = \frac{1}{T} \int_0^T V_T \cdot \overline{I_D} \cdot d(\omega t) + \frac{1}{T} \int_0^T V_T \cdot i_d \cdot d(\omega t) + \frac{1}{T} \int_0^T r_d \cdot i_D^2 \cdot d(\omega t)$$

$$\overline{P} = V_T \cdot \overline{I_D} + 0 + r_d \cdot I_D^2$$

$$\overline{P} = V_T \cdot \overline{I_D} + r_d \cdot I_D^2 = V_T \cdot \overline{I_D} + r_d \cdot (F_f \cdot \overline{I_D})^2$$

Donde :

$p_i$  : Potencia Instantanea.

$\overline{P}$  : Potencia Media durante el periodo.

$i_D$  : Corriente Instantánea que circula por el diodo.

$\overline{I_D}$  : Corriente Media de trabajo.

$i_d$  : Componente Alterna de la corriente instantánea  $i_D$ .

$I_D$  : Corriente Eficaz Total que circula por el diodo.

$r_d$  : Resistencia Dinámica del diodo para el punto de funcionamiento en  $I_D$  ;  $r_d = (V_D - V_T) / I_D$

$V_D$  : Caída de Tensión Media en el diodo, correspond. a  $I_D$ .

$V_T$  : Tensión de Umbral a la temperatura de trabajo.

$F_f$  : Factor de forma.

Ej : Determinar la potencia perdida en el diodo (BYX17 de PAFESA) funcionando con sus valores máximos, y con un ángulo de conducción de  $180^\circ$  (media onda). Los datos característicos del diodo son :  
 $\overline{I_D} = 150 \text{ [A]} - V_T = 0,9 \text{ [V]} - r_d = 1,2 \text{ [m}\Omega\text{]}$

Solución :

Para onda de corriente senoidal y ángulo de conducción de  $180^\circ$  el factor de forma será :  $F_f = \pi/2 = 1,57$

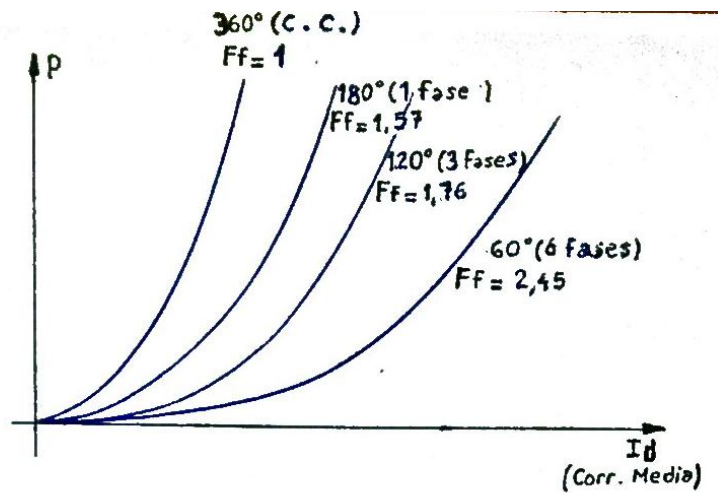
$$\overline{P} = 0,9 \text{ [V]} \cdot 150 \text{ [A]} + 0,0012 \text{ [}\Omega\text{]} \cdot (1,57 \cdot 150 \text{ [A]})^2 \Rightarrow$$

$$\overline{P} = 135 \text{ [W]} + 66,55 \text{ [W]} \Rightarrow \overline{P} = 201,55 \text{ [W]}$$

### OBTENCION DE LA POTENCIA PERDIDA A PARTIR DE CURVAS EXPERIMENTALES

En general los fabricantes suministran curvas obtenidas experimen-

talmente (con Vatímetro y Amperímetro), de las cuales se obtienen las pérdidas de potencia del diodo en función de la corriente directa media y del ángulo de conducción o del factor de forma, también en función del tipo de rectificador.



### DISIPACION DEL CALOR EN LOS DIODOS RECTIFICADORES

Los diodos rectificadores de potencia, generalmente se montan sobre radiadores (disipadores), para disipar de esta manera el calor generado interiormente.

El empleo de radiadores adecuados permite que el dispositivo pueda funcionar con cargas notables, sin rebasar la temperatura máxima admisible de la juntura. Para la refrigeración en el caso de potencias elevadas, puede ser necesario que la ventilación sea forzada.

Para un diseño eficaz del radiador, es necesario conocer los siguientes datos :

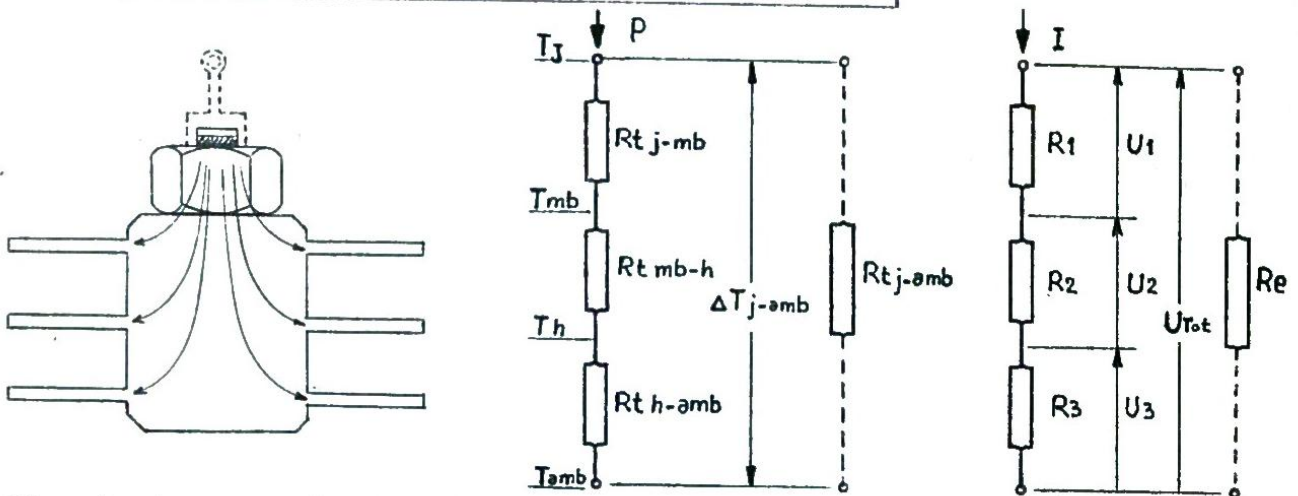
- $\bar{P}$  : Pérdida de Potencia en el diodo (Pot. a disipar).
- $T_j$  : Temperatura Máxima Admisible de la Juntura.
- $T_{amb}$  : Temperatura Ambiente.
- $R_{t\ j-mb}$  : Resistencia Térmica desde la Juntura a la Caja del diodo.
- $R_{t\ mb-h}$  : Resistencia Térmica desde la Caja al Radiador.
- $R_{t\ h-amb}$  : Resistencia Térmica desde el radiador al ambiente

Para el cálculo de la resistencia térmica del radiador se utiliza la denominada " LEY DE OHM TERMICA " , por su similitud a la ley de OHM en los circuitos eléctricos.

$$U [V] = I [A] \cdot R [\Omega]$$

$$T [^{\circ}C] = (T_j - T_{amb}) = P [W] \cdot R_t [^{\circ}C/W]$$

Ley de OHM térmica.



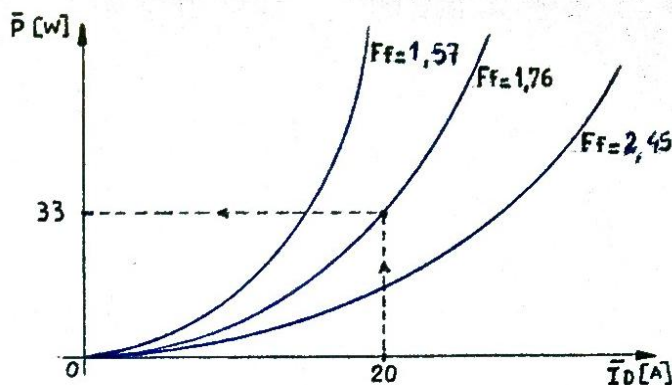
Ej. : Se desea calcular la resistencia térmica del radiador a utilizar para los diodos de la serie BY296 utilizados en un circuito rectificador trifásico en puente trabajando a  $f = 50$  [Hz]. Teniendo en cuenta para ello que por cálculo, la corriente media que recorre a c/diodo resulta igual a 20 [A]. Y que la  $T_{amb} = 40$  [ $^{\circ}C$ ].

Solución :

De las curvas dadas por el fabricante para el diodo dado se puede encontrar la potencia disipada en función de la corriente media y el factor de forma. En este caso será :

$$Ff = 1,75 \text{ (circuito trifás.)}$$

$$\bar{I}_D = 20 \text{ [A]}$$



$$T_j - T_{amb} = P \cdot (R_{tj-mb} + R_{tmb-h} + R_{th-amb})$$

$$R_{th-amb} = \frac{T_j - T_{amb}}{P} - R_{tj-mb} - R_{tmb-h}$$

De los datos dados por el fabricante, tenemos :

$$\begin{aligned} T_{jmax} &= 175 \text{ [}^\circ\text{C]} \\ R_{tj-mb} &= 1 \text{ [}^\circ\text{C/W]} \\ R_{tmb-h} &= 0,3 \text{ [}^\circ\text{C/W]} \end{aligned}$$

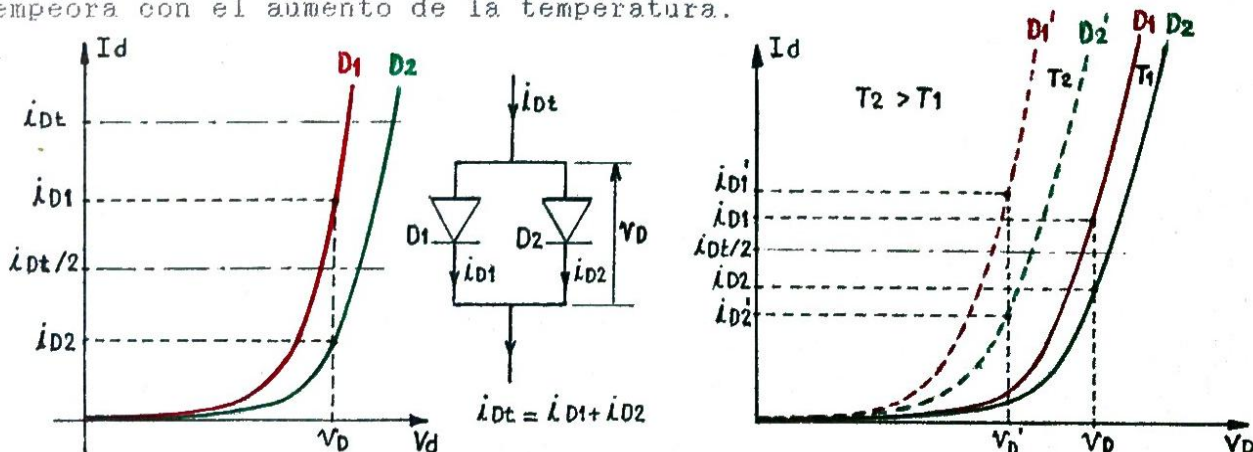
$$\Rightarrow R_{th-amb} = \frac{(175 - 40) \text{ [}^\circ\text{C]}}{33 \text{ [W]}} - (1 + 0,3) \text{ [}^\circ\text{C/W]} = 2,79 \text{ [}^\circ\text{C/W]}$$

## AGRUPAMIENTO DE DIODOS

### CONEXION PARALELO DE DIODOS

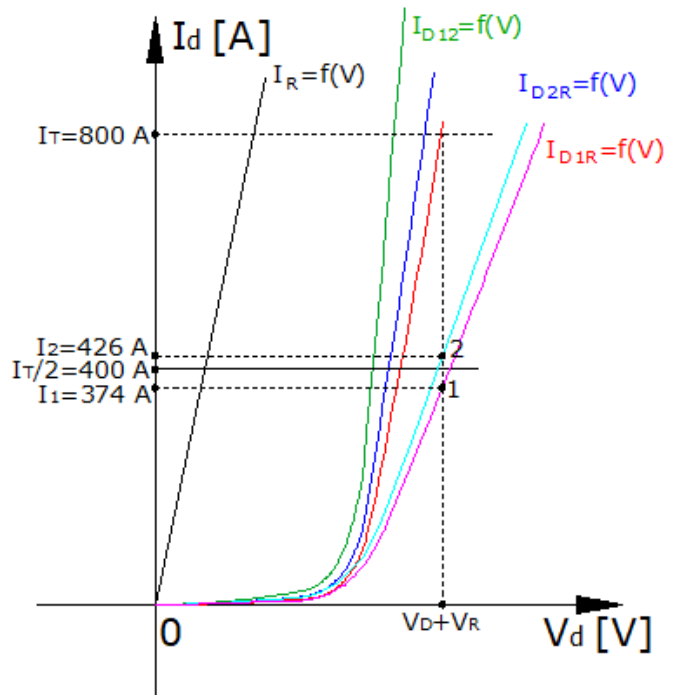
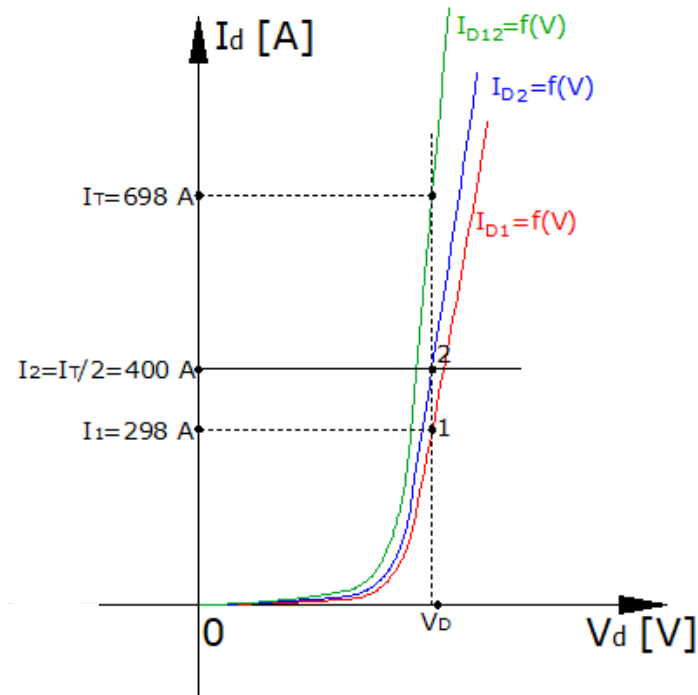
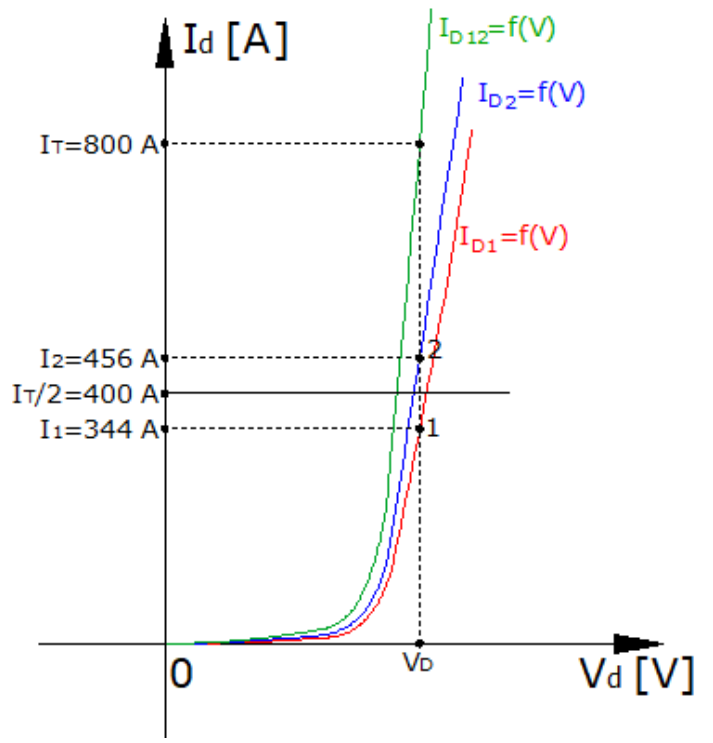
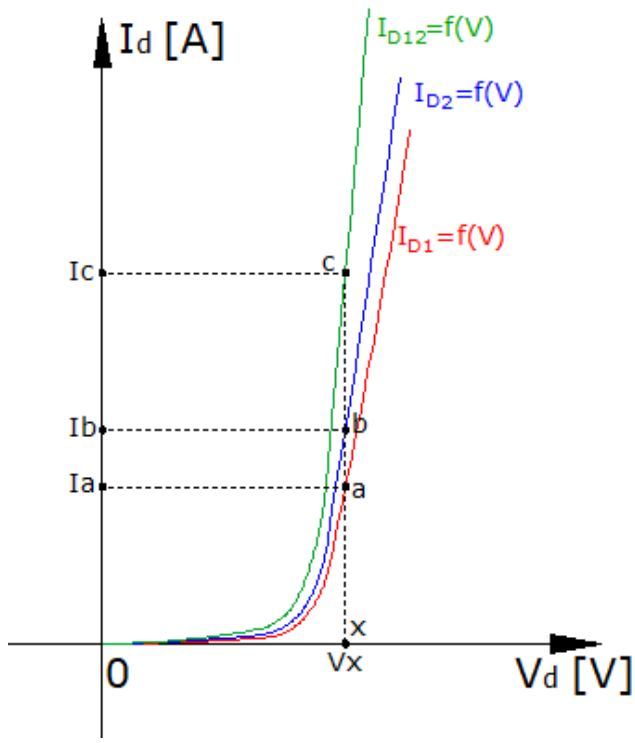
Cuando la corriente media que debe circular por el diodo en un circuito rectificador, supera la capacidad de los disponibles en el mercado, resulta conveniente, disponer diodos en paralelos. En este caso es necesario asegurar una adecuada distribución de las corrientes.

Como puede verse debido a las diferentes características Tensión-Corriente de los diodos se produce un reparto desigual de las corrientes, de manera tal que si " $i_{Dt}/2$ " es la máxima corriente que puede soportar cada diodo, el diodo D1 supera esa condición. Este efecto empeora con el aumento de la temperatura.



Existen varios métodos para obtener una equalización en las características de los diodos, y así poder conectarlos en paralelo. Ellos son:

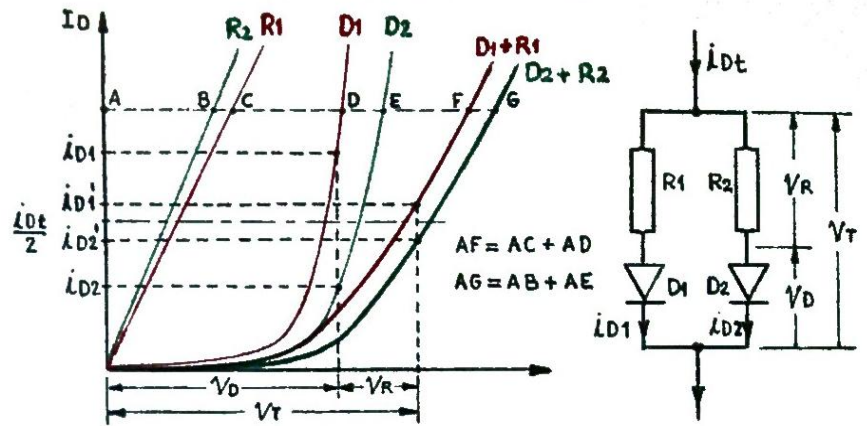
- 1) Colocación de resistencias de equilibrio en serie.
- 2) Apareamiento de las características directas de los diodos.
- 3) Equilibrio de corriente con reactores (inductancias).
- 4) Reducción de la capacidad de la corriente.



### 1) Colocación de resistencia de equilibrio en serie.

Esta solución se utiliza solamente para diodos de pequeña capacidad.

El resistor se elige de modo que en sus extremos se produzca una caída de tensión del orden de la caída de tensión de los diodos.  $V_R \cong V_D$



### 2) Apareamiento de las características directas del diodo.

Este método se utiliza para el caso de diodos con alto grado de apareamiento, logrado en base a una selección adecuada.

Se realiza en estas condiciones, una conexión directa usando para ello un factor de reducción de corriente.

Si suponemos que "  $D = I_{max} / I_M$  (Corr. Media Directa de c/diodo) (1) " es el desequilibrio de corriente, entonces si conectamos  $n$  diodos en paralelo e imponiendo que  $(n-1)$  tengan el máximo desequilibrio y el restante soporte la  $I_M$  podemos expresar que:

$$I_M + (n-1) \cdot I_{max} = I \cdot n = iDt \quad (2)$$

Siendo :

$I$  : La corriente en el supuesto que todos los diodos fueran iguales.

$n \cdot I = iDt$  : Es la corriente de carga total de una rama del rectific. Reemplazando (1) en (2):

$$I_M + (n-1) \cdot D \cdot I_M = n \cdot I$$

Operando tenemos:

$$\text{si } fd = I / I_M$$

$$\Rightarrow fd = 1/n + (n-1) \times D / n = D + (1-D)/n$$

que es el factor de distribución de corriente.  $D$  se toma como valor práctico 0,8 si los diodos tienen fusibles en serie se toma como 0,85.

$$\text{" } fd = (0,80 + 0,20 / n) \text{ " sin fusible.}$$

$$\text{" } fd = (0,85 + 0,15 / n) \text{ " con fusible.}$$

En esta condición se supone que la máxima corriente que puede soportar el diodo es :

$$I = fd \times I_M$$

y la corriente total que puede circular por  $n$  diodos vale :

$$I_t = n \cdot I = n \cdot fd \cdot I_M \Rightarrow I_t = [(n \cdot D + (1 - D))] \cdot I_M$$

Ej. : Calcular la corriente máxima tolerable por diez diodos conectados en paralelo y funcionando a máxima temperatura de la juntura. Los diodos corresponden a la serie 8YX96 con una corriente media máxima  $I_{FAVmax} = 30$  [A] y están protegidos por fusibles en serie.

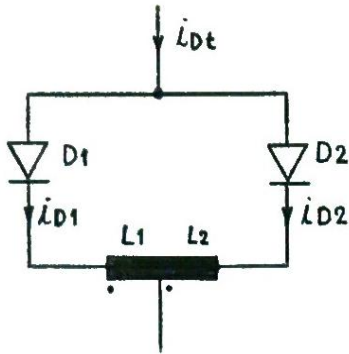
$$I_t = (n \cdot 0,85 + 0,15) \cdot I_{FAVmax} = (10 \cdot 0,85 + 0,15) \cdot 30$$

$$I_t = 279,5$$

### 3) Equilibrio de corriente con reactores.

Es el método preferido para el equilibrio de corrientes (se tienen

menos pérdidas de potencia).



Si el diodo D1 tiene menos tensión de umbral, será el primero en conducir. La corriente  $i_{D1}$  produce una fuerza contra electromotriz a través del bobinado S1 y S2 y obliga a D2 a conducir. Cuando cesa el periodo de conducción la corriente  $i_{D2}$  disminuye en primer lugar (porque tiene mayor tensión de umbral). Ello crea una nueva F.C.E.M. que aumenta el periodo de conducción de D2 y reduce el de D1. El resultado es que por D1 y por D2 circulan corrientes prácticamente iguales.

El valor de la inductancia óptimo se determina por la fórmula empírica:

$$L = 20000/w.I_{FRM} \text{ Donde :}$$

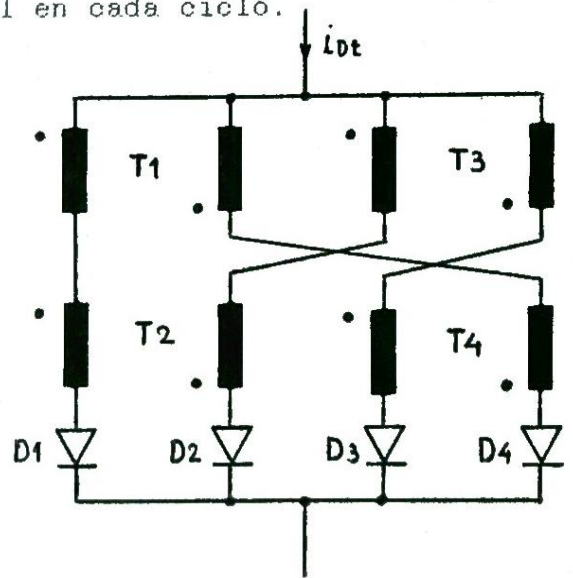
$w$  : es la Pulsación de la onda.

$I_{FRM}$  : es la Máxima Corriente Directa de Cresta del diodo.

Las exigencias mas importantes de la reactancia son : elevada densidad de flujo de saturación, y baja densidad de flujo remanente, para obtener el mayor cambio total en cada ciclo.

El siguiente circuito muestra la conexión de cuatro diodos en paralelo con reactancias de equilibrado. Cuando un diodo comienza a conducir genera una tensión en las reactancias que obliga al resto a conducir. Por ejemplo si el diodo D1 es el primero en conducir (menor tensión de umbral) los diodos D2 y D4 comienzan a conducir a través de T1 y T2 respectivamente, las tensiones generadas, por T3 y T4 hacen iniciar la conducción de D3.

Este sistema es el más satisfactorio a pesar de su costo y de los transitorios de sobretensión que se producen en la conmutación.



#### 4) Reducción de la capacidad de la corriente.

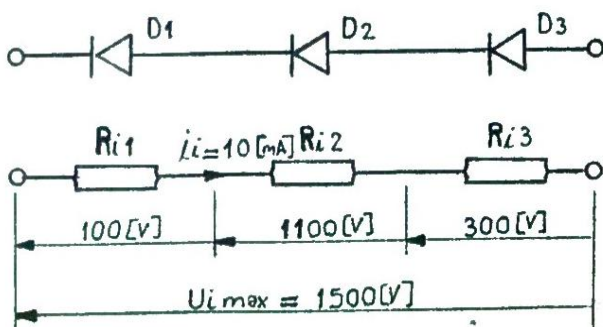
Este método es recomendable si los diodos tienen una gran capacidad de corriente media en relación a la referida.

Es decir cuando se de el caso particular de que uno sea insuficiente y dos excesivos.

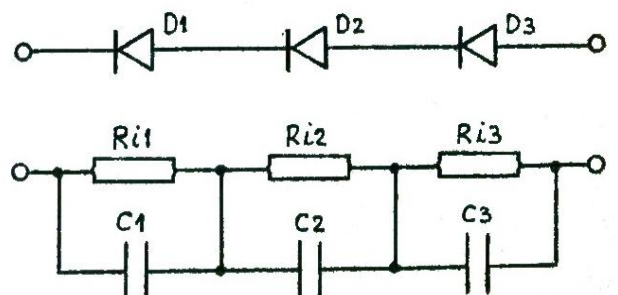
### CONEXION EN SERIE DE DIODOS

Las instalaciones en donde las tensiones inversas de trabajo superan a las admisibles ( $V_{RWmax}$ ) de los diodos la solución puede consistir en la conexión en serie de 2 o mas de ellos.

#### Régimen Estacionario



#### Régimen Transitorio



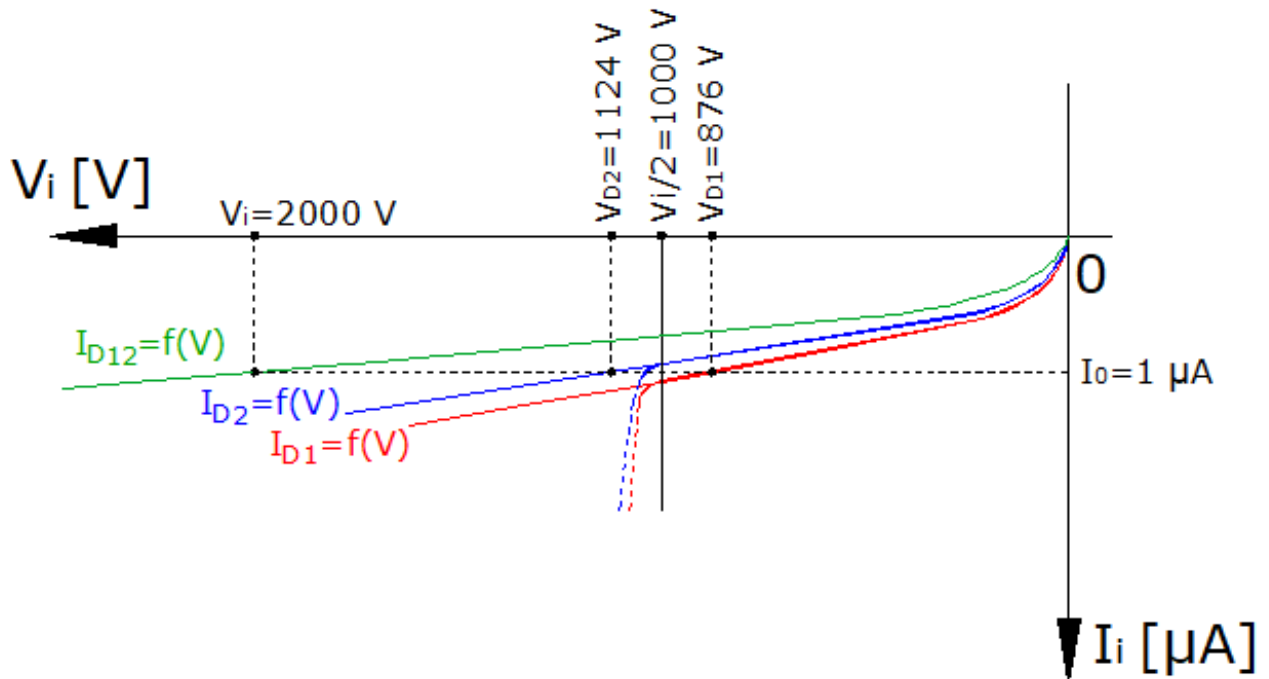
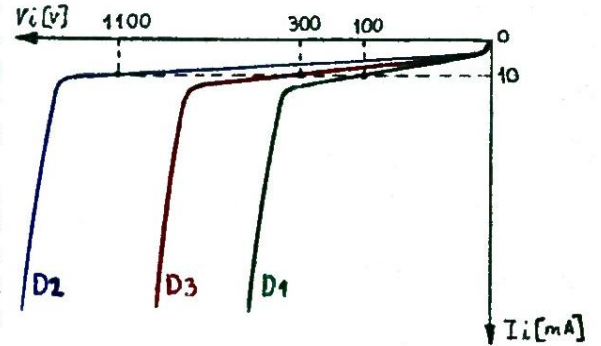
Con tal conexión surge el problema de asegurar una distribución suficientemente uniforme de la tensión inversa entre los diodos, tanto en régimen estacionario, como durante la conmutación (transitorio).

La aparición, aunque sea en uno de los diodos, de una tensión superior a la disruptiva motiva no solo la ruptura del diodo determinado, sino también de todos los restantes de la cadena que se exponen al régimen de sobretensión.

### REGIMEN ESTACIONARIO

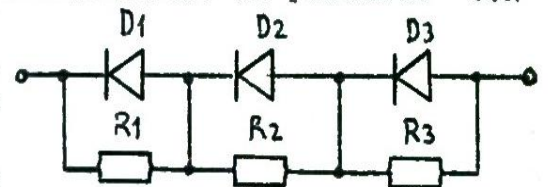
El origen a una distribución irregular en este régimen se debe a la divergencia en la pendiente de las porciones rectilíneas en las características Tensión-Corriente inversa de cada uno de los diodos conectados en cadena.

La poca pendiente da lugar a una divergencia considerable en la magnitud de las tensiones aplicadas a cada uno de los diodos puesto que a través de cada uno de ellos circula la misma corriente inversa.



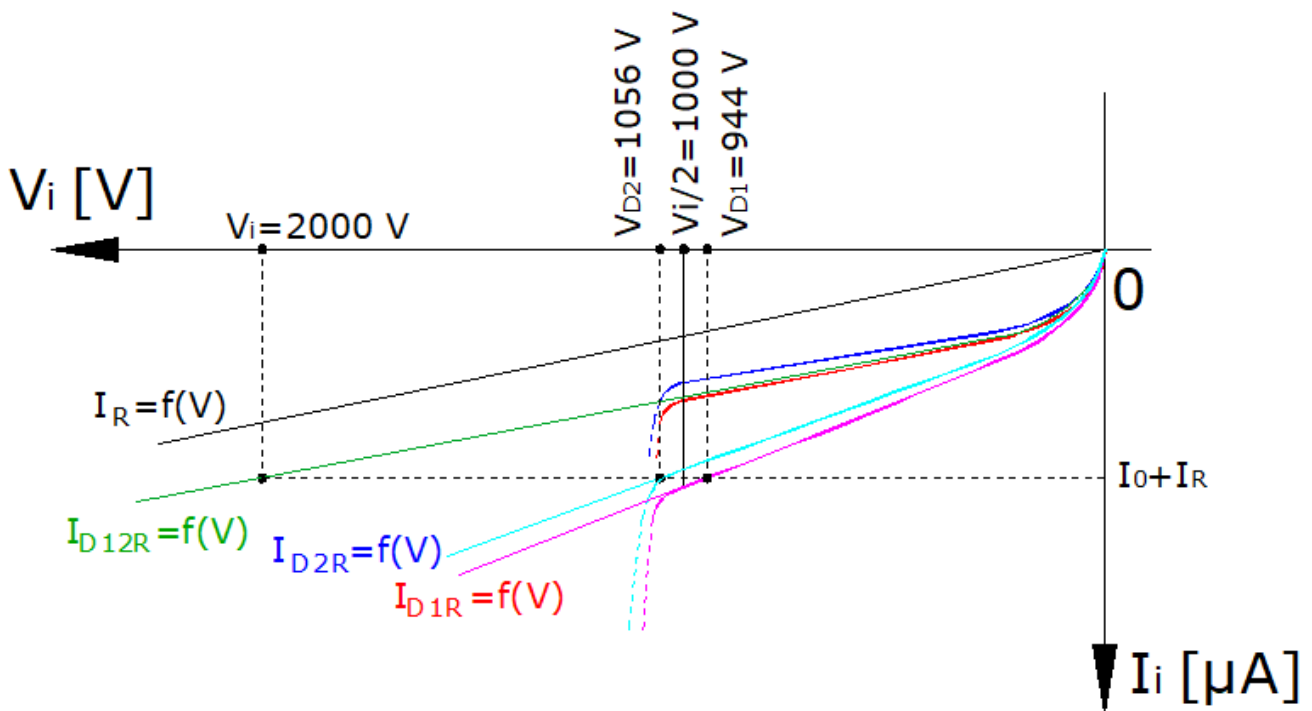
La solución para este régimen consiste, en distribuir en forma  $\pm$  uniforme la tensión, colocando para ello resistencias en paralelo con cada uno de los diodos.

Para la determinación del valor del resistor  $R$  y la cantidad diodos parte de considerar la situación mas desfavorable, que es la que se daría cuando, solo uno de los diodos de la cadena tiene una cierta corriente inversa y resto el despreciable (ver Circuitos Rectificadores,



Fapasa o Proyectos de Fuentes de Alimentación, Ing E. Villamil)

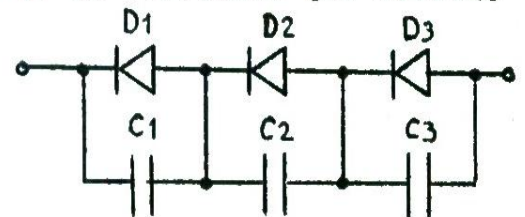




### REGIMEN TRANSITORIO

En régimen transitorio cuando los diodos conmutan del estado de conducción al estado de bloqueo, también es posible que se produzca, una irregularidad en las tensiones transitorias, que soportan los diodos de la cadena, causada por las diferentes cargas acumuladas en la capa central de los diodos y su diferente velocidad de recuperación. Esto es motivado por la incompleta identidad en las dimensiones geométricas de las capas de las uniones, como así también por las distintas capacidades interdiódicas y el tiempo de vida de los portadores. En estas condiciones los diodos que tengan menor tiempo de recuperación bloquearan primero la tensión inversa. Además de absorber dicha tensión los diodos recuperados prolongaran el tiempo de recuperación de los diodos mas lentos, al impedir la circulación de la corriente que elimine el acceso de carga almacenada.

Para mejorar la distribución de tensiones inversas en esta condiciones es preciso disponer capacitores en paralelo con cada diodo. Los condensadores representan fuentes de baja impedancia que absorben el exceso de carga almacenada, con lo cual reducen al mínimo el tiempo de recuperación de todos los diodo y se evita la aparición de sobretensiones en los diodos mas rápidos.



La capacidad necesaria, se puede calcular con las siguientes expresiones :

$$C \geq 5 \cdot t_{rr} \cdot n / R \quad [\mu F]$$

{

$n$  : N° de diodos de la cadena.

$R$  : Resistencia total serie  $[\Omega]$ .

$t_{rr}$  : Tiempo máximo de Recuperación del diodo  $[\mu\text{seg}]$ .

También :  $C = (Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}) / V_{\text{RRM}}$

Donde :  $Q_{max} - Q_{min}$  = Máxima dispersión esperada en la carga almacenada en la juntura de los diodos.

$V_{RRM}$  = Máxima tensión inversa de pico repetitiva.

Si no se conoce  $Q_{max}$  y  $Q_{min}$  se pueden calcular en forma aproximada con las expresiones :

$$Q_{max} [\mu Cb] = 2 \cdot I_{FAV} [A] \cdot t_{rr} [\mu seg]$$

$$Q_{min} = Q_{max} / 4$$

Para esta situación se llega a una expresión, que da la cantidad de diodos a colocar en la cadena cuando los mismos deban soportar una determinada tensión inversa de trabajo :

$$n \geq (1,5 \cdot V_i / V_{RWM}) - 0,5$$

$V_i$  = Máxima tensión inversa de trabajo impuesta por la aplicación.

$V_{RWM}$  = Máxima tensión de cresta de trabajo de c/diodo de la cadena.

Para el cálculo del resistor en paralelo se aplica :

$$R = V_{pi} / \alpha \cdot I_i$$

Donde :  $V_{pi}$  = Max. Tensión Inversa Repetitiva que soporta c/diodo, en condiciones de trabajo =  $(V_i / n)$ .

$\alpha$  = Coef. de Distribución vble.  $2 \leq \alpha \leq 10$ .

$I_i$  = Máxima Corriente Inversa.

Para una alta confiabilidad se adopta  $\alpha = 10$  para el caso de diodos de gran potencia.

LA potencia disipada por los resistor vale:

$$P_i = V_{efi}^2 / R = V_{R(RMS)}^2 / R$$

el valor de  $V_{efi}$  corresponde a la tensión eficaz inversa que soportan los diodos. Como este valor no es sinusoidal se pueden adoptar las siguientes formulas:

$$P_i = 0,25 \cdot V_{rwm}^2 / R \quad \text{Para circuitos rectific. monofásicos y bifásicos de media onda.}$$

$$P_i = 0,40 \cdot V_{rwm}^2 / R \quad \text{Para circuitos rectific. trifásico.}$$

Ej : Calcular la cantidad de diodos en serie o colocar para soportar una tensión inversa max.  $V_i = 2000$  [V] con diodos de potencia de las sigtes. características :  $V_{rwm} = 600$  [V] ;  $I_i = 0,05$  [mA]

$$n \geq (1,5 \cdot 2000 / 600) - 0,5 = 4,5 \Rightarrow \text{Adoptamos } n = 5 \text{ (Diodos)}$$

$$\text{Para } \alpha = 10 \Rightarrow R \leq (2000 / 5) / (10 \cdot 0,05) = 800 \text{ [k}\Omega\text{]}$$

$$P_i = 0,4 \cdot 600^2 / 800000 = 0,18 \text{ [W]} \quad \text{Se adopta un resistor de } 1/2 \text{ [W] de disipación.}$$

## PROTECCION CONTRA SOBRETENSIONES

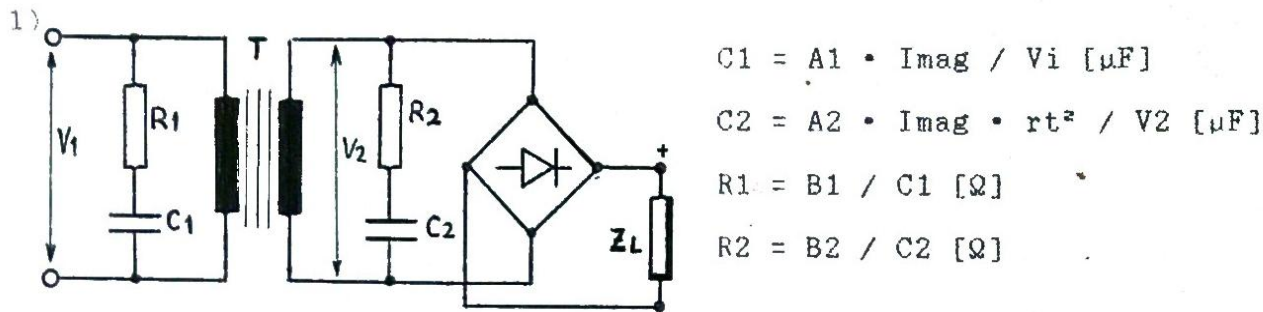
Tipos de transitorios :

- 1) Transitorio debido a la interrupción de la corriente magnetizante del transformador.
- 2) Transitorio debido a la conexión del primario del transformador.
- 3) Transitorio debido a la conexión de un transformador reductor.
- 4) Transitorio debido a la desconexión de una carga inductiva.
- 5) Transitorios cíclicos debidos a fenómenos de recuperación inversa.
- 6) Transitorios originados en circuitos en paralelo.

- 7) Sobre tensión debida a una carga regenerativa.
- 8) Perturbaciones aleatorias de red.

### PROTECCIONES

- 1) . Redes de amortiguamiento en // con primario o secundario del transformador.
- 2) Colocación de dispositivos de protección
- 3) Colocación de elementos en // con el diodo.
- 4) Selección de diodos con sobre capacidad.



$V1$  = Tensión eficaz del primario del trafo.  
 $V2$  = Tensión eficaz del secundario del trafo.  
 $r_t = V1 / V2$  = Relación de transformación.  
 $I_{mag}$  = Corriente eficaz de imanación del primario.

Los factores  $A1$  ,  $A2$  ,  $B1$  ,  $B2$  dependen de la relación ( $V_{rsm}/V_{rwm}$ ).

$V_{rsm}$  = Max. tensión inversa no repetitiva que soporte el diodo.

$V_{rwm}$  = Tensión inversa de cresta excluyendo los transitorios impuestos por el circuito.

VRSM VRWM	1,00	1,25	1,50	2,00
A1	800	550	400	200
A2	900	620	450	225
B1	300	260	225	150
B2	350	350	275	200

2) VARISTORES : Resistores que varían con la tensión. Requieren diodos diodos con una tensión de cresta de 5 a 6 veces la tensión de trabajo.

MOV (Metal Oxido Varistor) : Son de tamaños reducidos, admiten fuertes sobrecargas, poseen características simétricas respondiendo a :

$$I = K \cdot V$$

Selección : Según tensión de trabajo y energía inversa disipada.

$$W_i \geq L \cdot I_{mag}^2 = V \cdot I_{mag} / w \text{ (Tensiones disponibles de 40 a 1000 [V])}$$

### 3) ELEMENTOS EN PARALELO CON EL DIODO

$$R \leq V_{rwm} / I_{imax} \text{ } [\Omega]$$

$$C \leq 10 \cdot I_d / V_{rwm} \text{ } [\mu F]$$

### 4) SELECCION DE DIODOS CON SOBRE CAPACIDAD

Para diodos de alta capacidad de corriente, se toma un coeficiente de seguridad 2, en la determinación de la tensión de cresta inversa requerida. Para diodos normales el coef. puede estar entre 2 y 3.

### 3.14 RADIADORES PARA SEMICONDUCTORES

Los diodos rectificadores y los transistores disipan durante su funcionamiento una potencia que se traduce en una elevación de temperatura de la unión. Este aumento de temperatura aumenta la corriente inversa. El aumento de la corriente inversa provoca un nuevo aumento de la temperatura de la unión. El efecto es acumulativo y si la potencia disipada no se disipa inmediatamente hacia el exterior, la unión se destruye rápidamente. Entonces, es necesario evacuar el calor producido en la unión. Se logra eso, generalmente, añadiendo al diodo o transistor un refrigerador exterior de gran conductibilidad térmica (cobre o aluminio).

#### 3.14.1 EVACUACIÓN DEL CALOR

Es necesario poder calcular la elevación de temperatura de la unión con respecto a la temperatura ambiente en función de la potencia disipada. Estos cálculos, deducidos de las leyes de conducción del calor, presentan una gran analogía con los que utiliza la ley de Ohm.

La evacuación puede hacerse:

- por contacto: fenómeno de conducción;
- por convección: circulación de un fluido sobre el material (refrigerador);
- por radiación: emisión de radiaciones (sin contacto ni movimiento de fluido).

#### 3.14.2 LEY DE OHM TÉRMICA

Existe analogía entre un circuito térmico y un circuito eléctrico. En la figura 3.26, tenemos:

$$T_A - T_B = R_{AB} P_C \text{ (term.)} \quad (3-48)$$

$$V_A - V_B = R_{AB} I \text{ (elect.)} \quad (3-49)$$



Fig. 3.26

De las fórmulas (3-48) y (3-49), podemos deducir la equivalencia siguiente:

<i>Circuito térmico</i>	<i>Circuito eléctrico</i>
Temperatura . . . . .	Potencial
Potencia térmica. . . . .	Corriente eléctrica
Resistencia térmica. . . . .	Resistencia eléctrica.

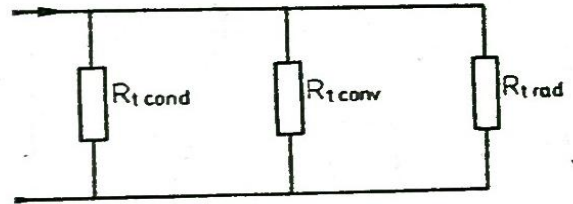


Fig. 3.27

La resistencia térmica total será la resistencia equivalente de las tres resistencias en paralelo representativas de los tres fenómenos de evacuación de calor (figura 3.27).

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{t\text{con.}}} + \frac{1}{R_{t\text{rad.}}} + \frac{1}{R_{t\text{conv.}}}$$

### 3.14.3 CÁLCULO DE LA SUPERFICIE DE ENFRIAMIENTO NECESARIO PARA DISIPAR UNA POTENCIA $P_c$

Para asegurar un enfriamiento eficaz del transistor lo más sencillo es utilizar la convección natural, añadiendo al elemento una aleta de enfriamiento cuya superficie será calculada en función de la potencia a disipar.

Se conoce generalmente:

- la potencia máxima que puede disipar la unión del elemento ( $P_{c\text{max}}$ );
- la resistencia térmica interna  $R_{jc}$  medida según el caso entre la unión y el extremo del tornillo de fijación;
- la temperatura máxima de la unión  $T_{j\text{max}}$ .

Estos valores son indicados en las características del elemento. Se obtiene el cálculo del refrigerador o radiador con la ayuda de la ley de Ohm térmica. El elemento diodo o transistor es comparado a un generador térmico dando una potencia  $P_c$  igual a la potencia máxima que puede disipar este elemento y con una resistencia interna  $R_{jc}$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{vatios}$ ) medida entre la unión y la cápsula o caja.

La figura 3.28 a representa la fijación de un transistor de potencia sobre una superficie de disipación (*Heat-Sink*). Se ve que la resistencia térmica total es la

suma de una serie de resistencias térmicas totales enumeradas a continuación y representadas en la figura 3.28 b.

$$R_T = R_{jc} + R_{cr} + R_{ra} \quad (3-50)$$

$R_T$  = resistencia térmica total;

$R_{jc}$  = resistencia térmica total entre la unión y la cápsula del dispositivo;

$R_{cr}$  = resistencia térmica total entre la cápsula y el radiador;

$R_{ra}$  = resistencia térmica total entre el radiador y el ambiente.

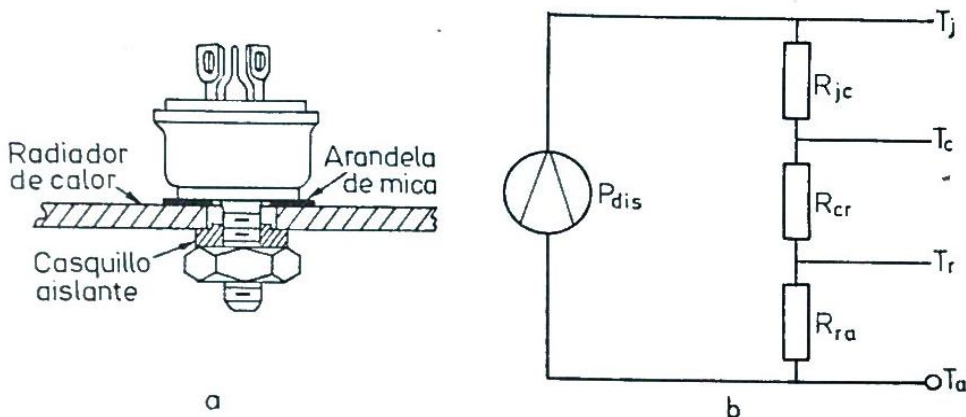


Fig. 3.28

Veamos cómo se calcula el valor de la resistencia térmica  $R_{ra}$  en función de un material disponible.

El valor de la resistencia térmica  $R_{cr}$  depende del tipo de fijación entre el semiconductor y el radiador. En el caso que el dispositivo esté aislado eléctricamente del radiador por una arandela de mica, tendremos:

$$R_{cr} = 122 E \text{ (}^\circ\text{C/W)}$$

donde  $E$  representa el espesor de la arandela de mica, en centímetros.

Tendremos cuidado para evitar los espacios muertos entre la cápsula, la arandela de mica y el radiador utilizando barniz de silicona. Con la ley térmica podemos escribir:

$$T_j - T_a = P_c (R_{jo} + R_{cr} + R_{ra}) = P_c \cdot R_T \quad (3-52)$$

Así podemos calcular la resistencia térmica del radiador en función de la potencia disipada y de la temperatura ambiente:

$$R_{ra} = \frac{T_j - T_a}{P_c} - (R_{jo} + R_{cr}) \quad (3-53)$$

Cuando conocemos  $R_{ra}$  podemos calcular la superficie del radiador con la fórmula siguiente:

$$S = \frac{1}{R_{ra} \cdot \sigma} \quad (3-54)$$

$\sigma$  = coeficiente de expansión térmica en (vatios/ $^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^2$ ).

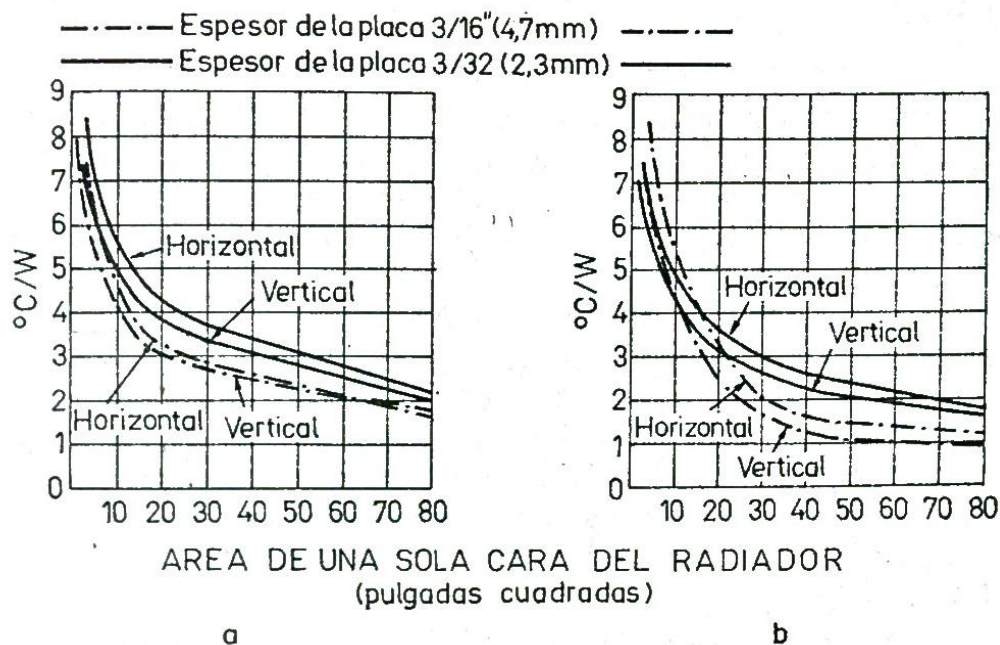


Fig. 3.29 a) Características de transferencia de calor para radiador cuadrado de aluminio; b) para radiador cuadrado de cobre.

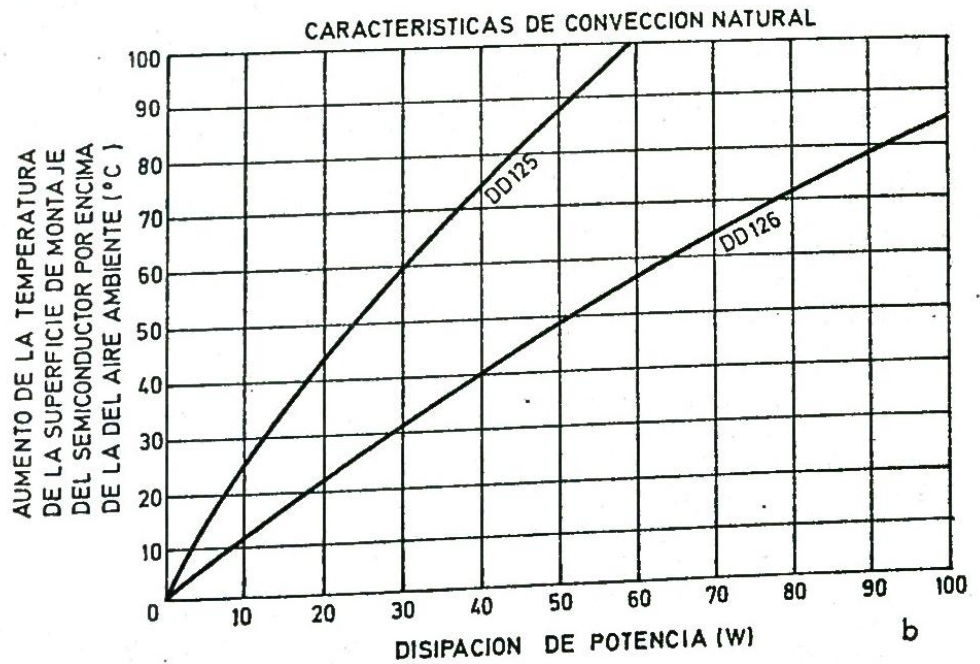
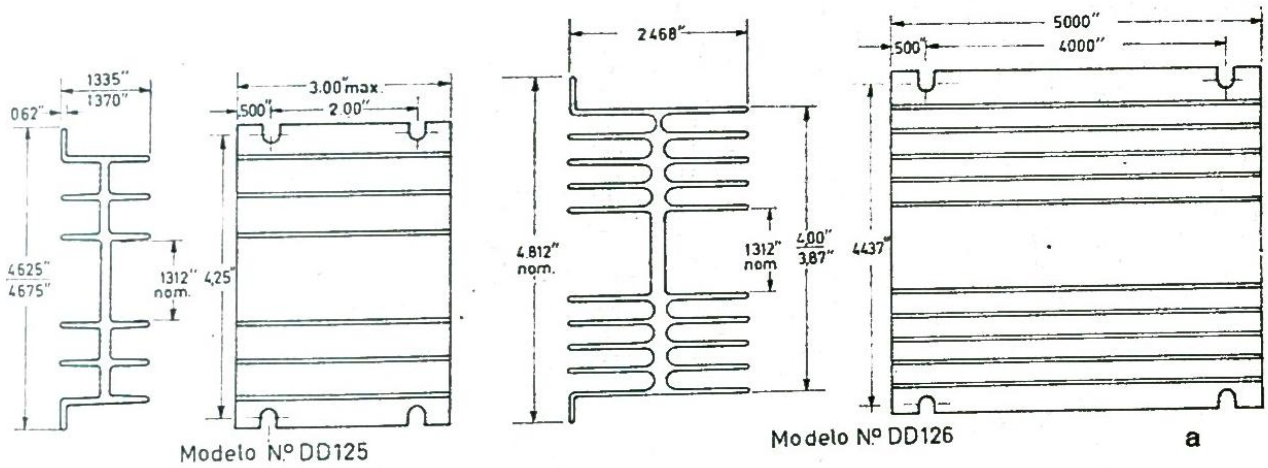


Fig. 3.30

Este coeficiente depende de la forma del radiador, de su composición, de la temperatura de la unión (o envoltura) y de la temperatura ambiente. Para una superficie cuadrada podemos encontrar curvas características.\* Pero sin calcular exactamente esta superficie, haciendo caso omiso de algunos parámetros (en termodinámica la práctica se aleja mucho de la teoría), podremos considerar este cálculo como válido teniendo en cuenta un coeficiente de seguridad.

Las figuras 3.29 a y b\*\* dan los valores de resistencia térmica de radiadores para el aluminio y el cobre, respectivamente.

Se entiende que estos radiadores se usan en convección natural. Se puede disminuir la resistencia térmica forzando el flujo de aire en las aletas (ventilador).

La figura 3.30 muestra las características dadas por el fabricante "International Rectifier" para sus radiadores modelos DD125 y DD126.

### 3.14.4 EJERCICIO

Un transistor 2N539 (PNP) se usa aislado eléctricamente de su radiador y disipa 8 W máx. en un circuito determinado.

Calcular el radiador si se usa un aislante de mica (*mica washer*) de 0,1 mm de espesor. El transistor tiene las siguientes características:

Temperatura de la unión: 95° C máx.

Resistencia térmica unión-cápsula: 2,2° C/W máx.

Tenemos:

con

$$T_j - T_a = P_c (R_{jc} + R_{cr} + R_{ra})$$

$$T_a = 45^\circ \text{C (supuesto)}$$

$$R_{jc} = 2,2^\circ \text{C/W (fábrica)}$$

$$R_{cr} = 1,22^\circ \text{C/W}$$

$$R_{ra} = \text{a determinar.}$$

$$R_{ra} = \frac{T_j - T_a}{P_c} - (R_{jc} + R_{cr})$$

$$R_{ra} = \frac{95 - 45}{8} - (2,2 + 1,22) = 2,83^\circ \text{C/W.}$$

El radiador debe tener una resistencia térmica de 2,7° C/W, o menos.

SOLUCIONES:

1. Radiador cuadrado de aluminio (figura 3.29 a)

1.1 En posición horizontal

Espesor de  $\frac{3}{16}$  pulgada: 35 pulgadas cuadradas.

Espesor de  $\frac{3}{32}$  pulgada: 60 pulgadas cuadradas.

\* Ejemplo página 362 del libro de J. P. OEHMICHEN "Empleo racional de los transistores".  
\*\* R 188, FITCHEN, "Transistor Circuit Analysis and Design"; The Van Nostrand Series, 1967.



1.2 *En posición vertical*

Espesor de  $\frac{3}{16}$  pulgada: 30 pulgadas cuadradas.

Espesor de  $\frac{3}{32}$  pulgada: 48 pulgadas cuadradas.

2. *Radiador cuadrado de cobre (fig. 3.29 b)*

2.1 *En posición horizontal*

Espesor de  $\frac{3}{16}$  pulgada: 23 pulgadas cuadradas.

Espesor de  $\frac{3}{32}$  pulgada: 38 pulgadas cuadradas.

2.2 *En posición vertical*

Espesor de  $\frac{3}{16}$  pulgada: 18 pulgadas cuadradas.

Espesor de  $\frac{3}{32}$  pulgada: 23 pulgadas cuadradas.

3. *Se dispone de radiadores IR, modelos DD125 y DD126 (figura 3.30)*

La potencia a disipar:  $P_e = 8 \text{ W}$ .

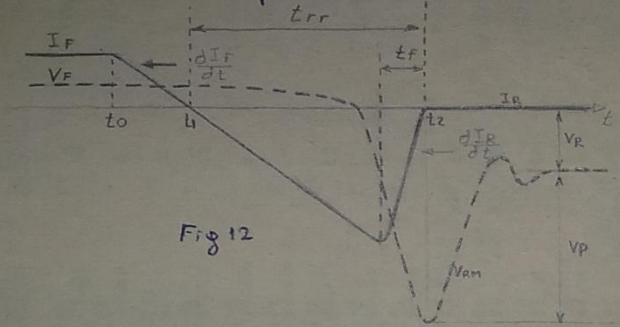
Incremento de temperatura admisible con respecto a la temperatura ambiente:  $22,5^\circ \text{ C}$ .

Cualquiera de los dos modelos de radiadores sirven. Se usará el modelo DD125 por cuestión de costo.

NOTA. Como se ve, existen diez (10) soluciones propuestas a este problema. El costo y la disponibilidad determinarán la elección final.

# 1) TIEMPO DE RECUPERACION

Cuando un diodo pasa del estado de polar. directa a inversa bruscam. se requiere cierto tiempo de spuás de la conmutación para q' pase al estado de bloqueo.  
 - A eso tiempo se lo denomina "Tiempo de Recuperación":  $t_{rr}$   
 - Durante ese tiempo el diodo equivale a un corto-circ. en polar. inversa

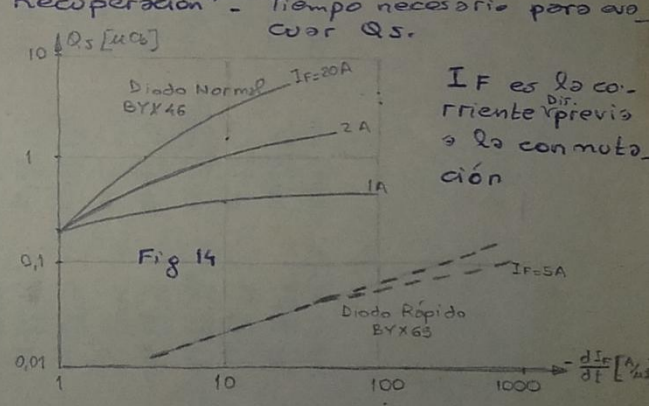
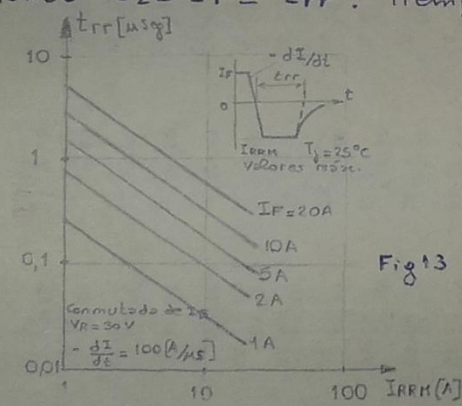


$t_f$ : Tiempo de caída, en el se produce la > parte de la disipación debido al transitorio.  
 En el  $t_f$  el diodo pasa gradualm. al estado de bloqueo. y es impuesto por el diodo al igual q' la  $I_{RRM}$ .  
 Siendo  $t_f$  y  $I_{RRM}$  especificaciones usuales en diodos rápidos.

# La corriente inversa del D corresponde a la eliminación de una carga  $Q_s$  almacenada en conducción directa.

$$Q_s = \int_{t_1}^{t_2} i \cdot dt$$

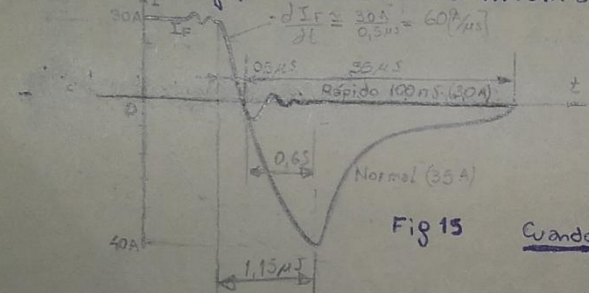
Siendo  $t_2 - t_1 = t_{rr}$ : "Tiempo de Recuperación". Tiempo necesario para evacuar  $Q_s$ .



- La energía cedida en la recuperación es  $W = Q_s \cdot V_R$  electrostática en los elementos capac. del diodo y asociados, que da lugar a sobre tensiones y luego es disipada en forma de calor.

- La potencia disipada por el D sera:  $P = Q_s \cdot V_R \cdot f$

- En la fig. 14 se ve que en  $Q_s$  normal  $\approx 200 \approx 500$   $Q_s$  rapido  $\Rightarrow$  a igualdad de pérdidas y para evacuar la misma carga



$t_{normal} \approx 200 \approx 500 t_{rapido}$   
 $f_{rapido} \approx 200 \approx 500 f_{normal}$

$P_{conmutación} \approx 10 \cdot P_F$  y más a  $\gg f$   
 Ej  $f \approx 1 [kHz]$  se deben usar diodos rápidos para regimenes no ~~...~~

Cuando:  $t_{rr} \gg t_f$ ,  $I_{RR} < \frac{V_R}{R}$  Limitador de I

$$Q_s = \int_{t_1}^{t_2} i \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{dI_F}{dt} \cdot t \cdot dt = \frac{dI_F}{dt} \cdot \frac{t_{rr}^2}{2}$$

$$t_{rr} = \sqrt{\frac{2 Q_s}{\frac{dI_F}{dt}}}$$

$$I_{RR} = t_{rr} \cdot \frac{dI_F}{dt} \approx \sqrt{2 Q_s \frac{dI_F}{dt}}$$

Cuando  $R$  externa debe limitar la máxima corriente al valor de  $I_{RRM}$ .

