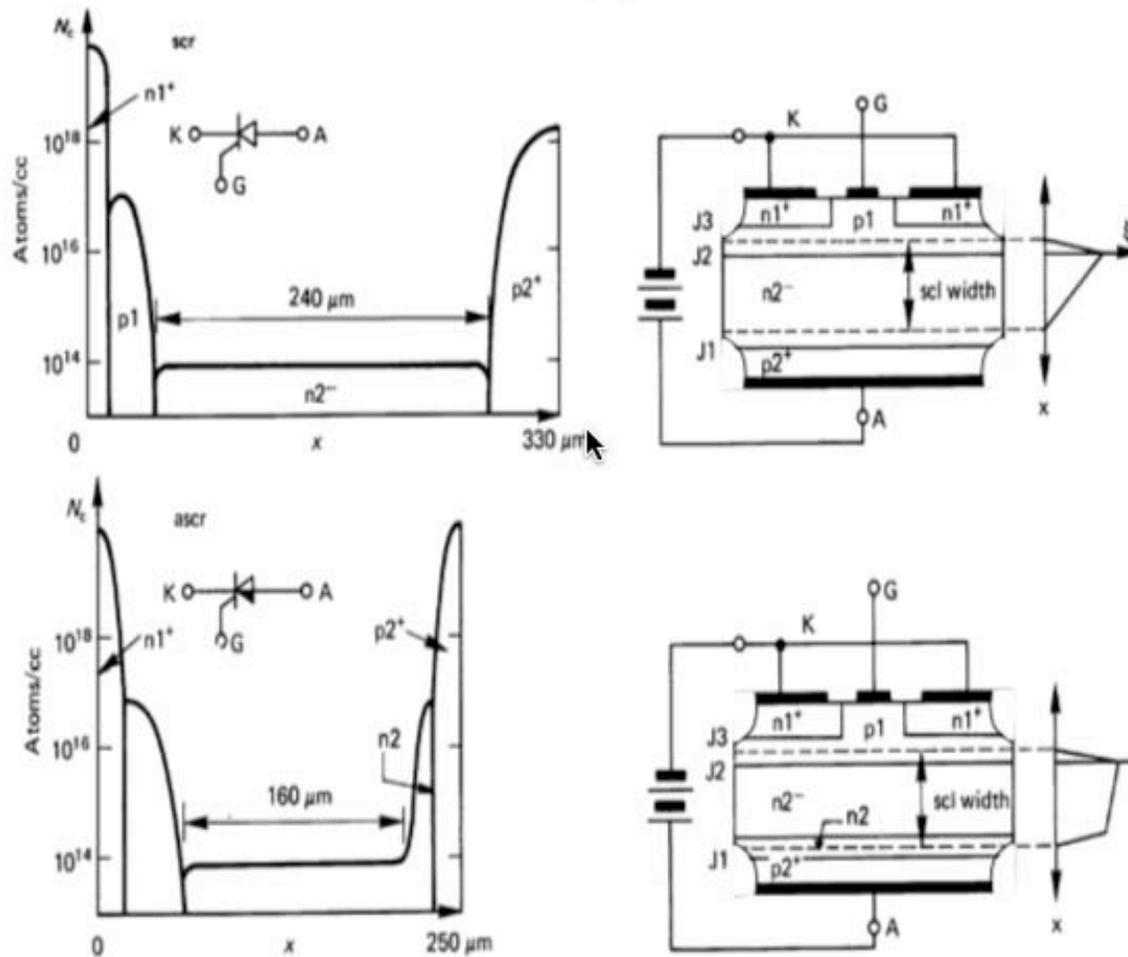


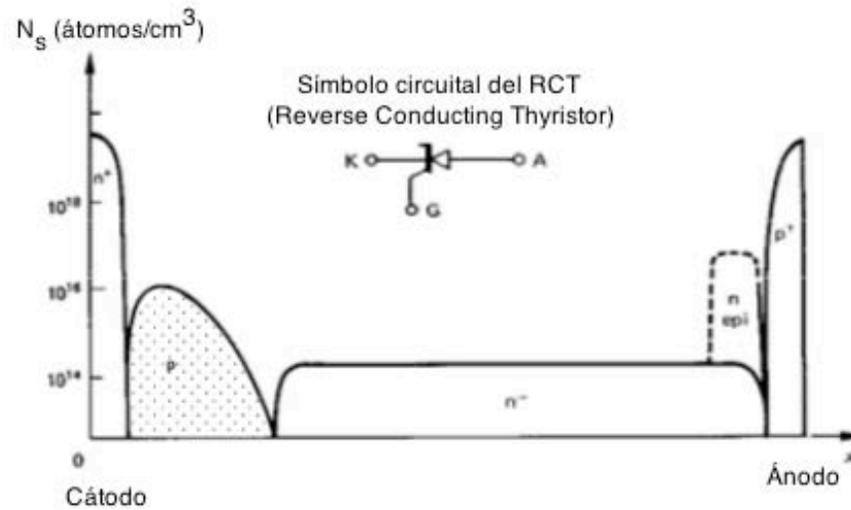
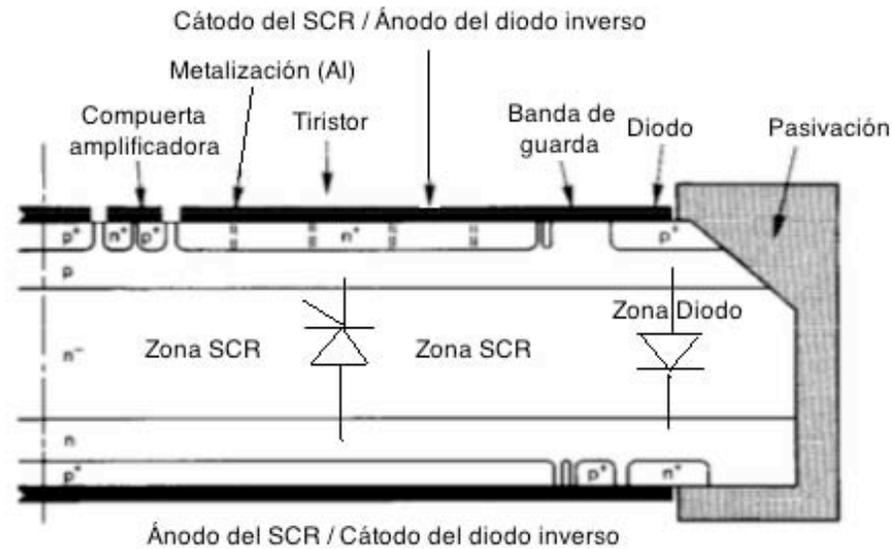
TIPOS DE TIRISTORES.

- 1.- De control de fase o de propósitos generales ("Converter grade"): optimizados para operar en aplicaciones AC de baja frecuencia ("frecuencia de línea", hasta unos 400Hz) que requieren tensiones de bloqueo directa e inversa iguales.
- 2.- Rápidos ("Fast Thyristor"): optimizados para operar en aplicaciones de apagado forzado y relativa "alta frecuencia" (1kHz) en convertidores DC/DC y DC/AC.
- 3.- Asimétricos (ASCR: "Asymmetric SCR"): optimizados para operar en aplicaciones de apagado forzado y "alta frecuencia" (algunos kHz) en convertidores DC/DC y DC/AC, la capacidad de bloquear tensiones inversas se minimiza, para maximizar la caída en conducción.



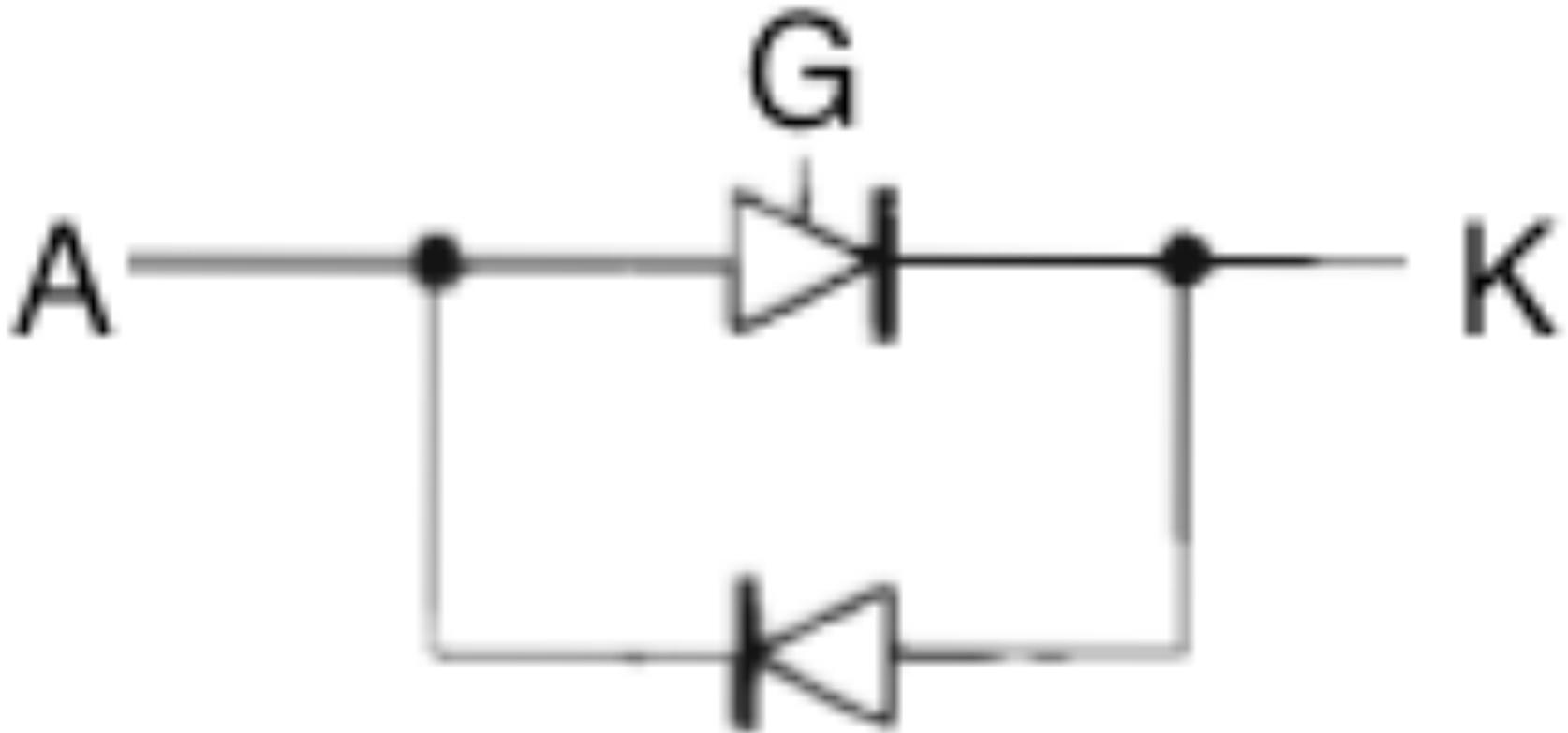
Comparación entre el perfil de dopado, la estructura y el perfil del campo de bloqueo de un tiristor de propósitos generales y uno asimétrico.

4.- De conducción inversa (RCT: "Reverse Conducting Thyristor"). Son el caso extremo de la asimetría, la estructura cristalina incorpora un diodo que permite la libre conducción en sentido inverso, eliminando completamente la capacidad de bloqueo de tensiones inversas para maximizar su velocidad de conmutación y aumentar su utilidad en las configuraciones convertoras DC/DC y DC/AC, en la mayoría de las cuales los dispositivos conmutadores unidireccionales deben ser asociados con diodos que permitan automáticamente la circulación de corriente inversa, usualmente llamados "diodos rueda libre" ("free-wheeling diodes").



Tiristor de conducción inversa (RCT).

Corte esquemático (arriba), símbolo circuital (centro), perfil de dopado (abajo).

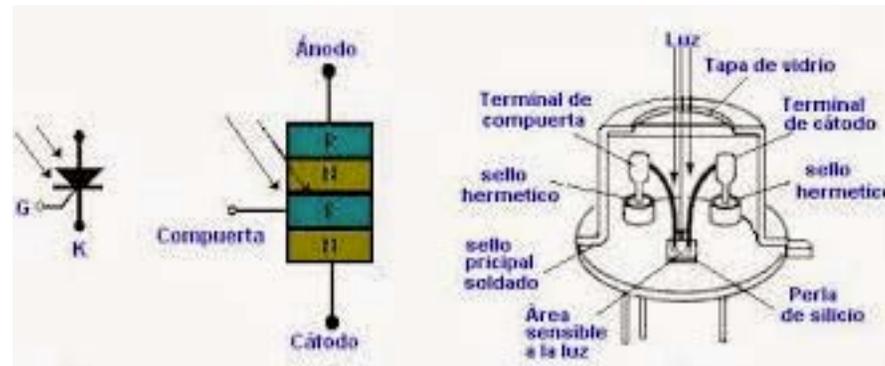


Modelo equivalente funcional del tiristor de conducción inversa.

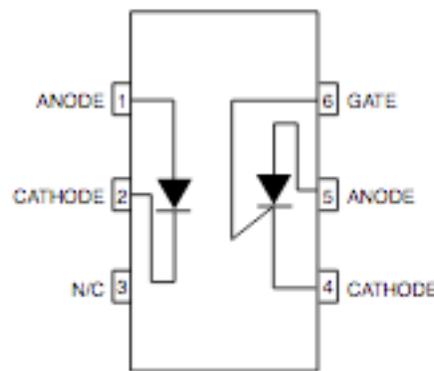
5.- Activados por luz (LASCR: Light Activated S.C.R o LTT: Light Triggered Thyristor).

Son dos familias de tiristores cuya zona de compuerta es sensible a ciertas longitudes de onda del espectro de luz, lo que permite activarlos mediante un pulso de luz de frecuencia lumínica adecuada e intensidad suficiente para generar in situ los portadores necesarios para producir el disparo. en general estos tiristores no tienen un contacto eléctrico de compuerta

5.a.-La denominación LASCR usualmente se refiere a tiristores pequeños, frecuentemente encapsulados junto con un diodo emisor de luz en un paquete que opera como opto-acoplador con salida tipo tiristor.



LASCR en encapsulado individual.
 Símbolo circuital (izquierda), esquema de la estructura
 (centro) y esquema del montaje en el encapsulado.



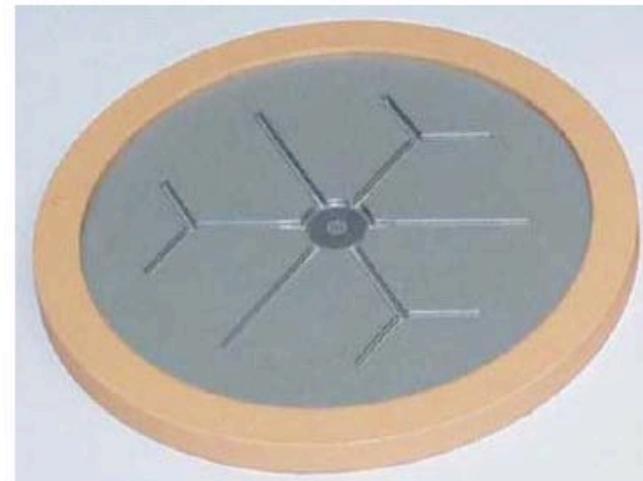
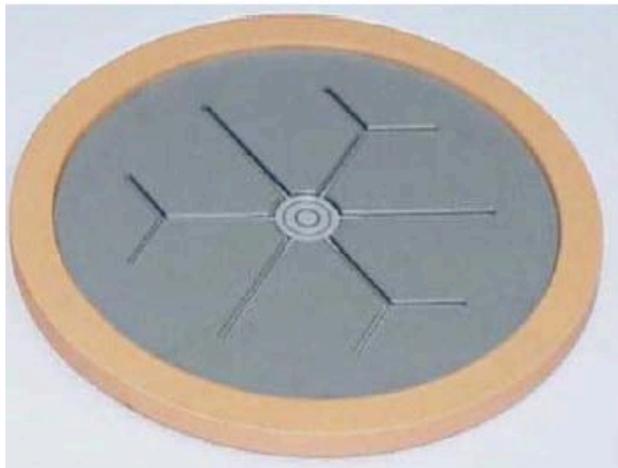
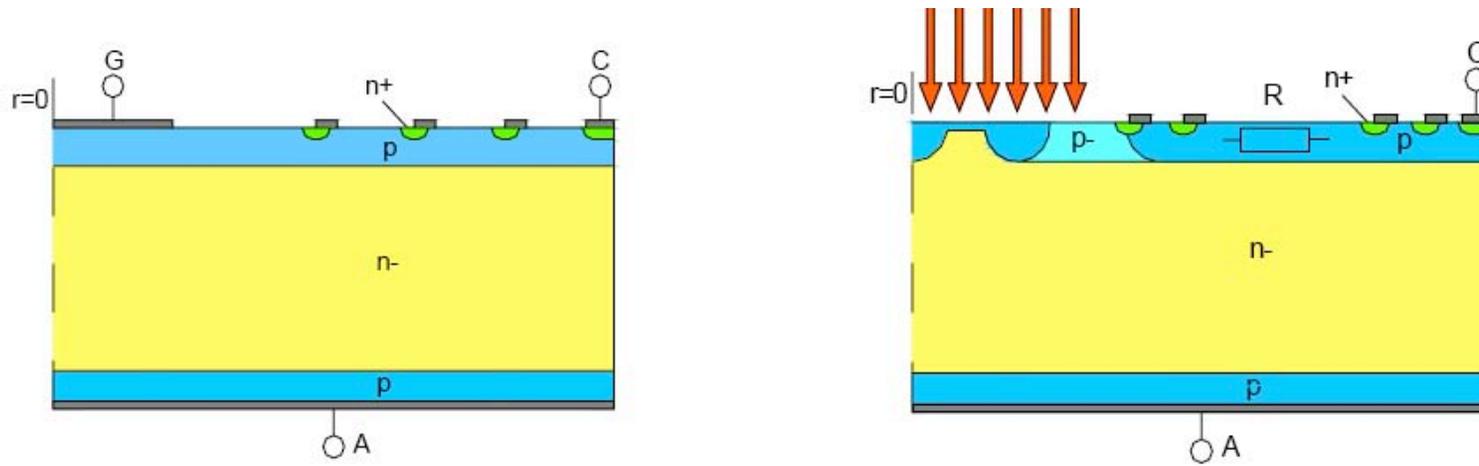
Esquema circuital de 4N39, opto-acoplador con LASCR,
 cortesía Fairchild.

5.b.-La denominación LTT se emplea usualmente para componentes de mucha mayor potencia que se emplean en aplicaciones de muy alta tensión en sistemas eléctricos de transmisión tipo FACTS (Flexible AC Transmission Systems) o HVDC (High Voltage DC).

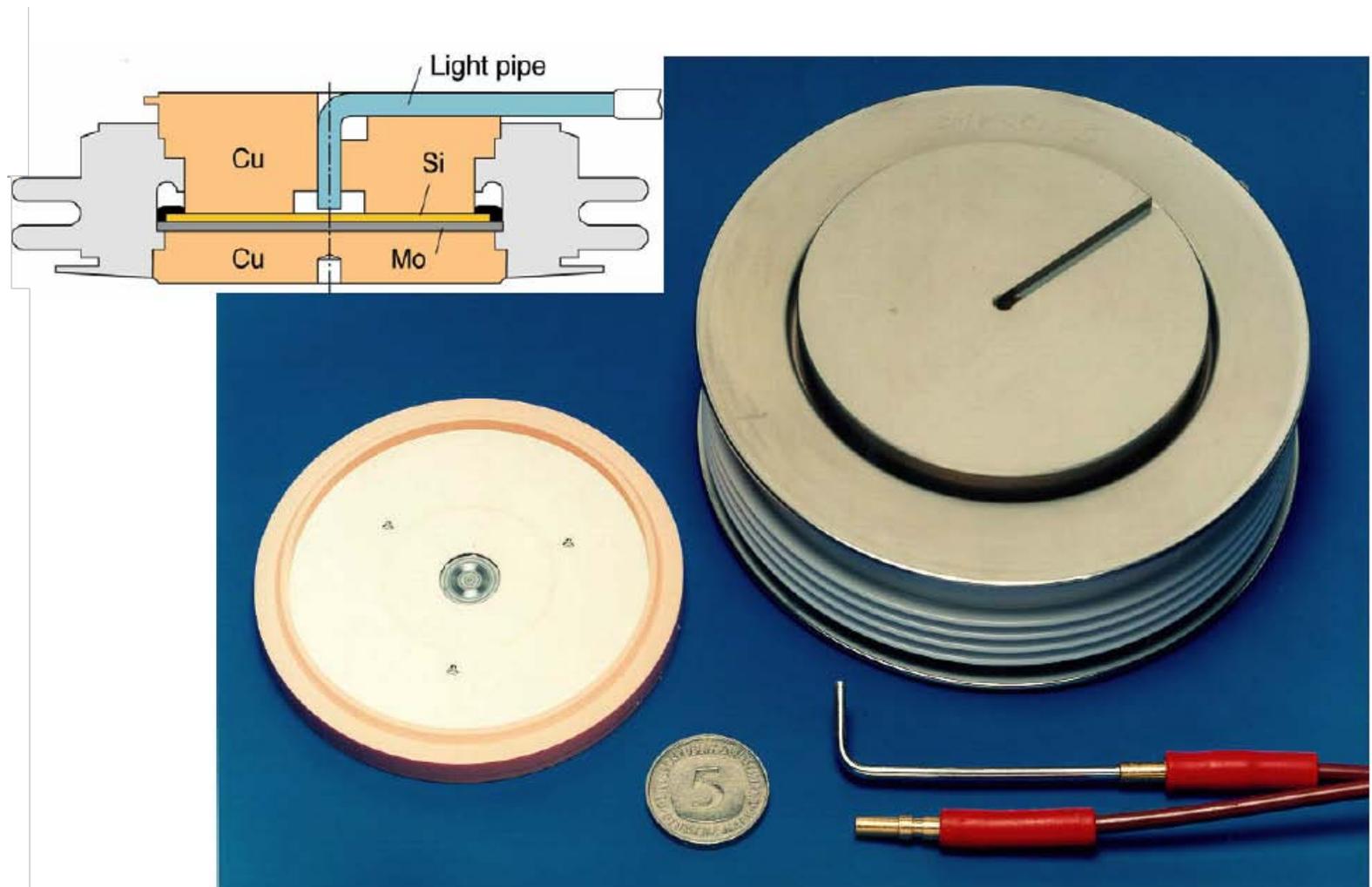
Los LTT (Light Triggered Thyristors) son dispositivos tipo tiristor de muy alta potencia encapsulados tipo “hokey puk” con dos terminales eléctricos (ánodo y cátodo) y uno óptico (compuerta de disparo) para fibra óptica, que permiten la circulación unidireccional de corriente del terminal de ánodo al de cátodo cuando el terminal de ánodo es positivo respecto al cátodo y se ha aplicado un pulso de luz de disparo en el terminal de compuerta, usualmente mediante una fuente tipo LASER.

Los LTT ofrecen el mejor aislamiento entre el tiristor y el circuito de disparo, y están optimizados para aplicaciones de muy alta tensión, en configuraciones que emplean varios/muchos tiristores conectados en serie que deben ser encendidos en el mismo instante.

Dado que la cantidad de portadores que se pueden generar con los pulsos luminosos es limitada, los LTT debe tener todos una configuración de compuerta amplificadora



Comparación entre un tiristor de alta potencia convencional (izquierda) y uno activado por luz (derecha).



Corte esquemático de un LTT (arriba izquierda), LTT sin encapsular (abajo izquierda) y LTT encapsulado (derecha)

Device	4" - LTT	5" - LTT
	(with integrated overvoltage protection)	
forward protection voltage	min. 7500 V	
repetitive peak reverse voltage	8000 V	
non-repetitive peak reverse voltage	8300 V	
on-state voltage (I T = 3000 A)	max. 2.6 V	max. 2.3 V
di/dt capability	300 A/ μ s	
dv/dt capability (V D = 7.5 kV)	3500 V/ μ s	
surge on-state current (10 ms)	35 kA	63 kA
turn-off time	max. 350 μ s	max. 350 μ s
min. light trigger power	10 mW	

Características resultantes de un LTT de alta potencia para aplicaciones en sistemas de transmisión de energía eléctrica.

Fuentes de luz aplicables al disparo de los LTT.

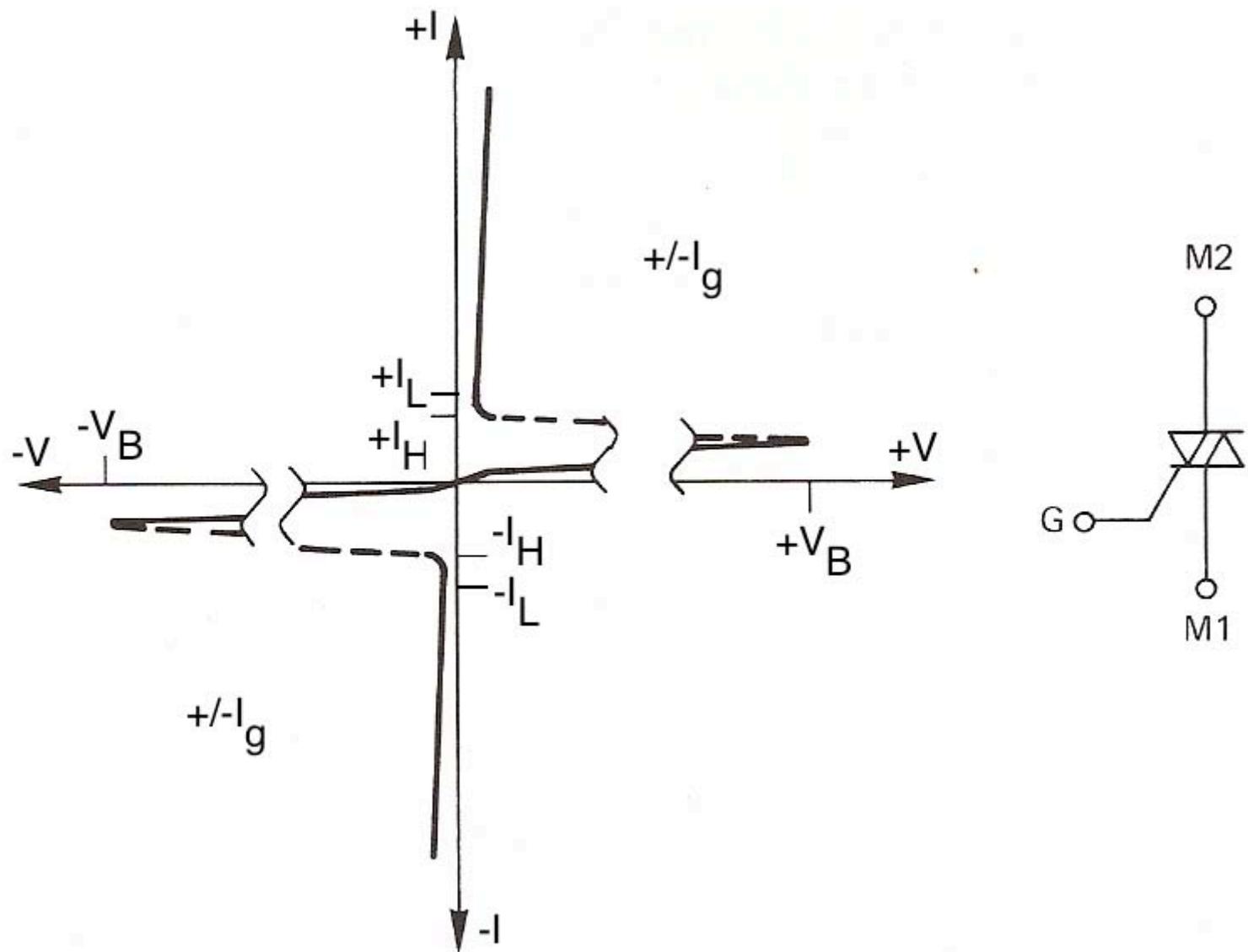
Fuente de luz	Ventajas	Desventajas
Láser GaAs (pulsos)	Alta potencia, facilidad de acople a múltiples fibras ópticas.	Pulsos, generarlos requiere de fuentes pulsantes de alta potencia
Láser GaAs- GaAlAs (emisión continua)	Potencia continua, facilidad de acople a múltiples fibras ópticas	Costoso, delicado.
LED GaAs	Barato	Baja densidad de radiación, problemas de acople.

6.-Tiristores bidireccionales (TRIAC: Triode for AC)

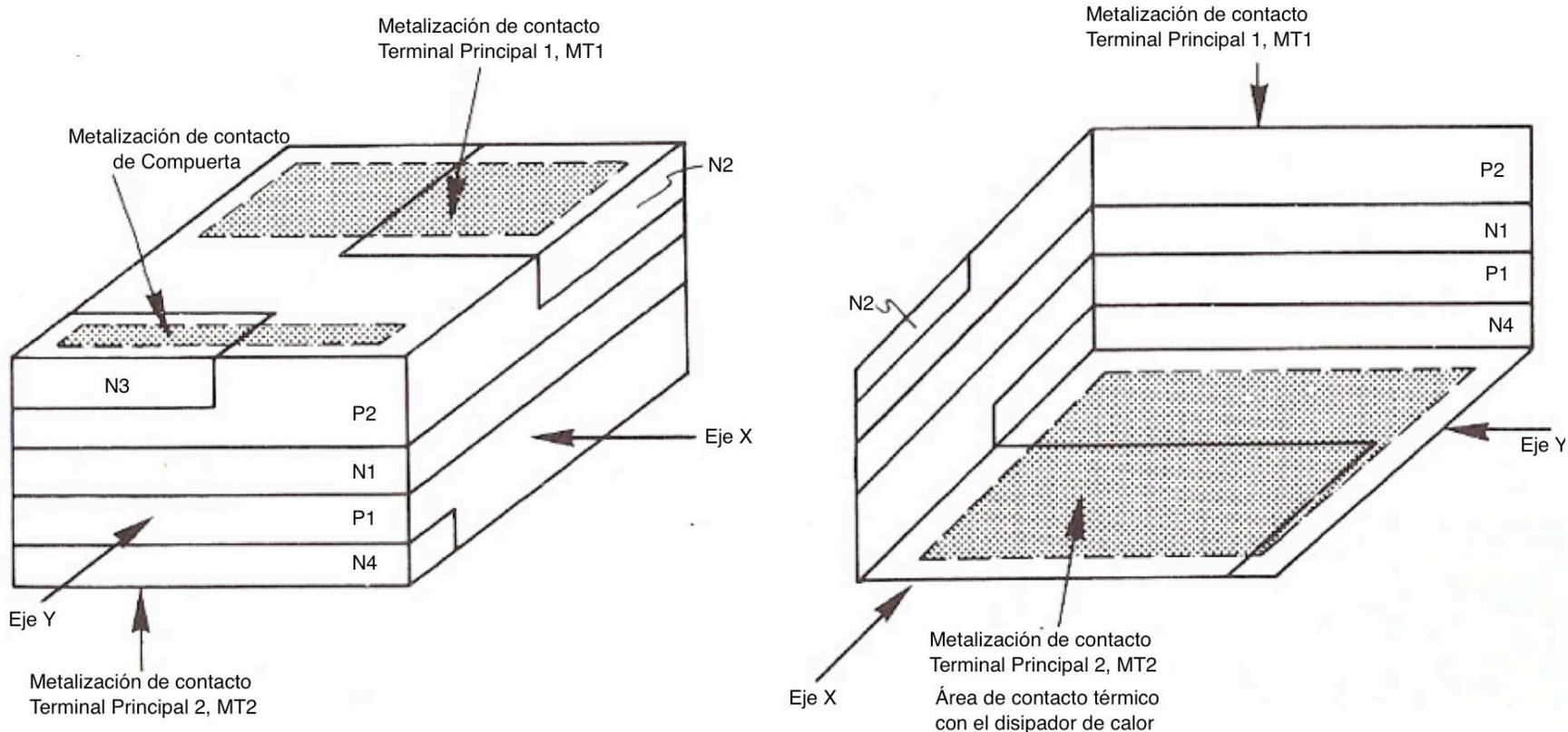
Son dispositivos de tres terminales, el terminal principal 1, MT1 (“Main Terminal 1”), el terminal principal y 2, MT2 (“Main Terminal 2”) y el terminal de compuerta, que permiten la circulación bidireccional de corriente entre los dos terminales principales cuando se aplica un pulso de disparo en el terminal de compuerta.

El TRIAC puede ser disparado por pulsos de corriente positivos o negativos, tanto cuando el MT1 es positivo respecto al MT2 como con la polaridad inversa.

Operativamente un TRIAC es equivalente a dos tiristores con los terminales principales (ánodo y cátodo) conectados en antiparalelo, pero con una compuerta de disparo común.



TRIAC: curva V/I característica (izquierda) y símbolo circuital (derecha).

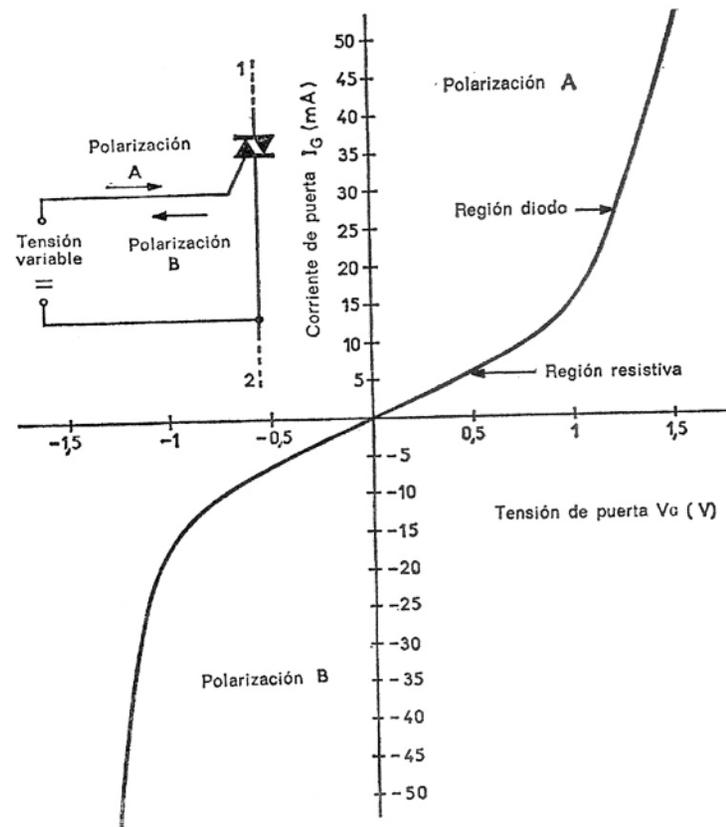


Esquema de la estructura general de un TRIAC mostrando las regiones de dopado y los puntos de contacto con el exterior.

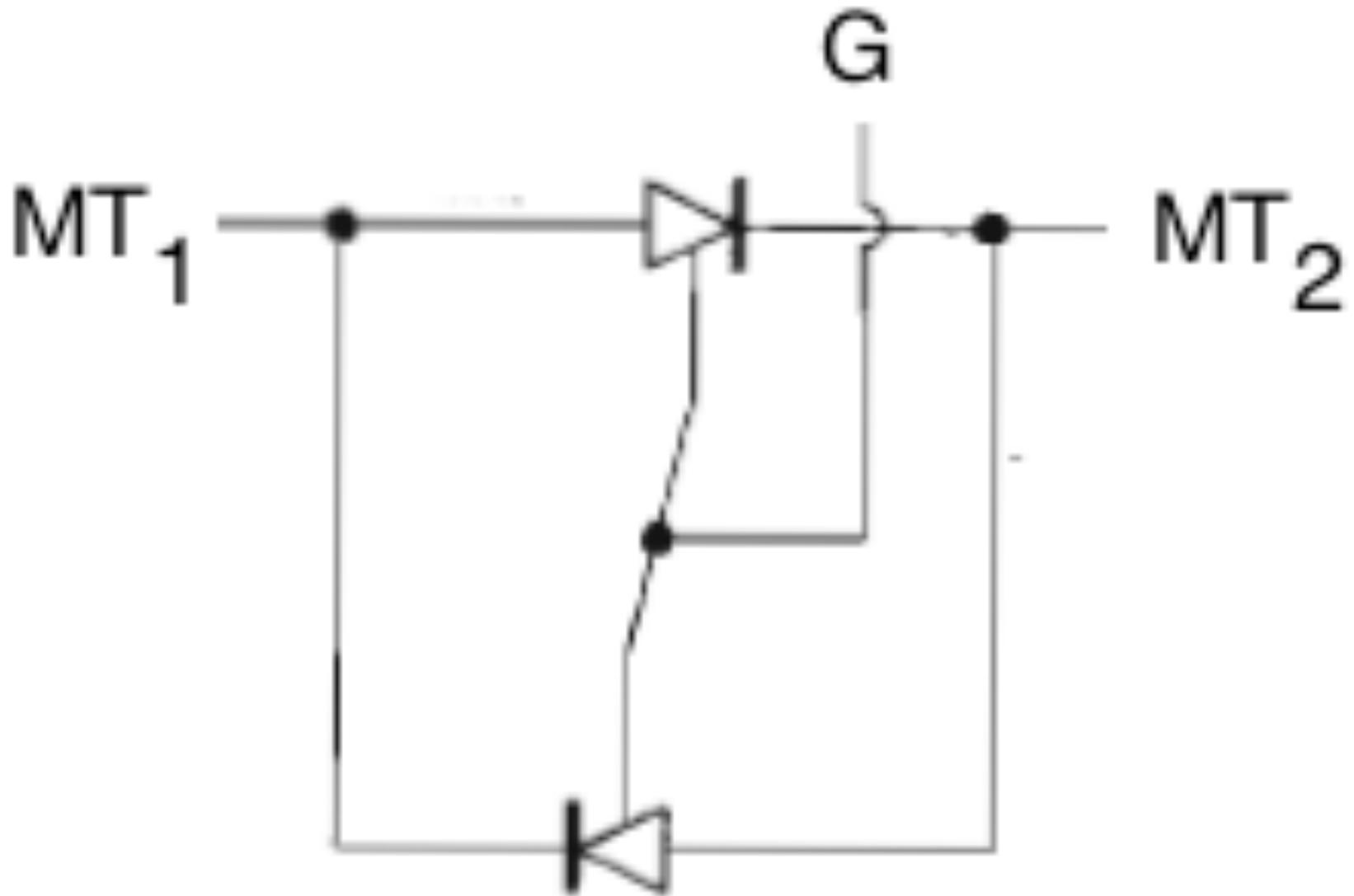
Estructuralmente el TRIAC es un componente bastante complejo formado por una estructura tridimensional formada por dos zonas con dopado tipo P y cuatro con dopado tipo N.

La operación del TRIAC es igualmente compleja, las zonas que se activan dependen de las polaridades relativas de los dos terminales principales y del sentido de la corriente de compuerta, lo que define los cuatro modos posibles de operación, cada uno representable mediante un circuito equivalente específico.

También existen TRIACs con compuerta foto-sensible, que son equivalentes funcionales a los LASCR.



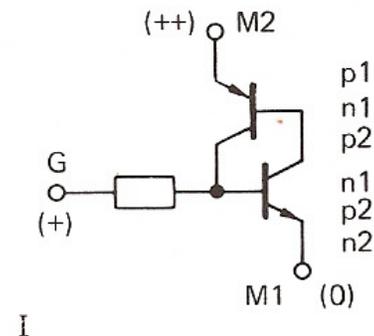
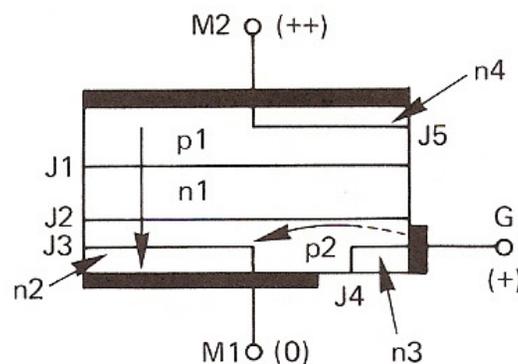
Característica V/I típica de la juntura de compuerta del TRIAC.



Modelo equivalente funcional del TRIAC

MODOS DE DISPARO DEL TRIAC:

1.- Modo I: Disparo en el primer cuadrante.



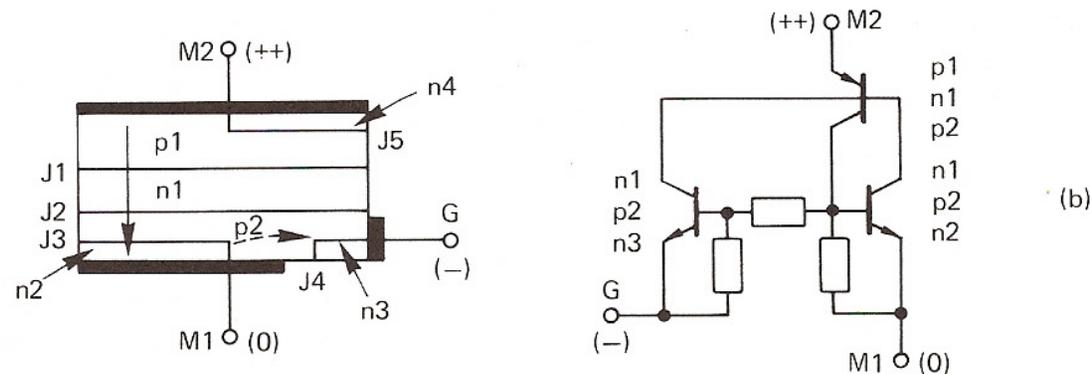
49

(a)

El terminal principal 2 (M2) es positivo respecto al M1 y la corriente de compuerta, positiva (entrante) polariza en directo la juntura p2-n2 (J3). Esto activa el tiristor equivalente formado por las regiones p1-n1-p2-n2.

En este modo de operación el TRIAC tiene la máxima sensibilidad de disparo y es el modo de operación recomendado.

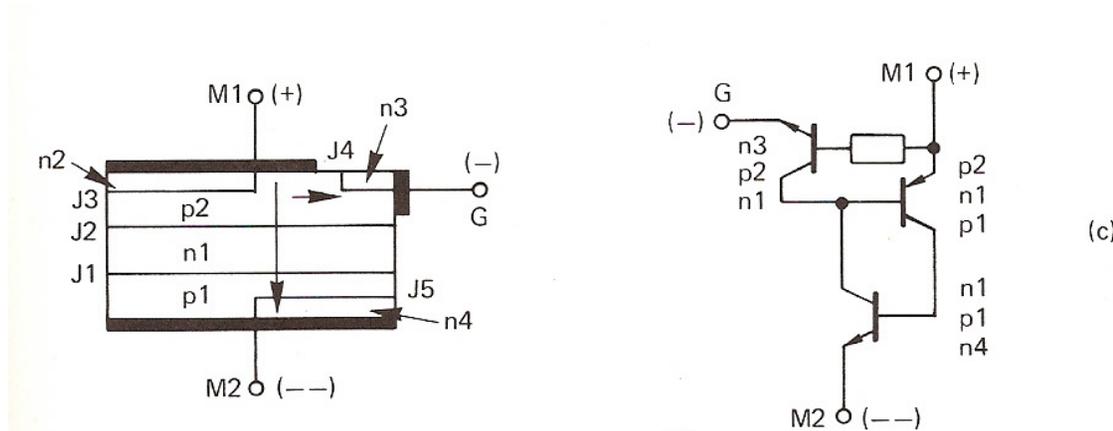
2.- Modo II: Disparo en el segundo cuadrante.



El terminal principal 2 (M2) es positivo respecto al M1 y la corriente de compuerta, negativa (saliente) polariza en directo la juntura p2-n3 (J4). La corriente lateral (p2-n3) polariza en directo al tiristor auxiliar equivalente p1-n1-p2-n3, lo que hace que circule corriente a través de la juntura J3 a la región n2, activando el tiristor equivalente formado por las regiones p1-n1-p2-n2.

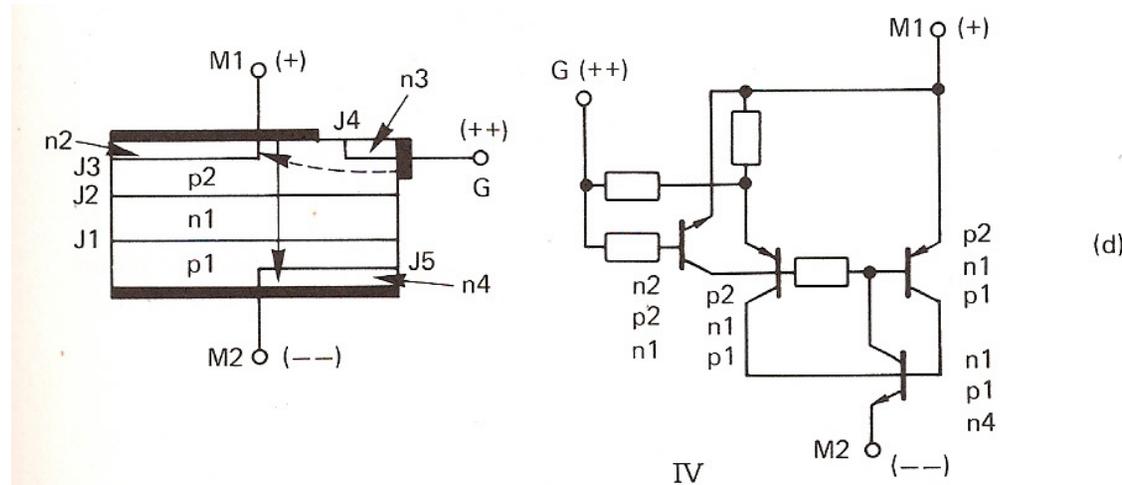
Este modo de operación llamado “junction gate operation” produce altas pérdidas en conmutación y no se usa normalmente.

3.- Modo III: Disparo en el tercer cuadrante.



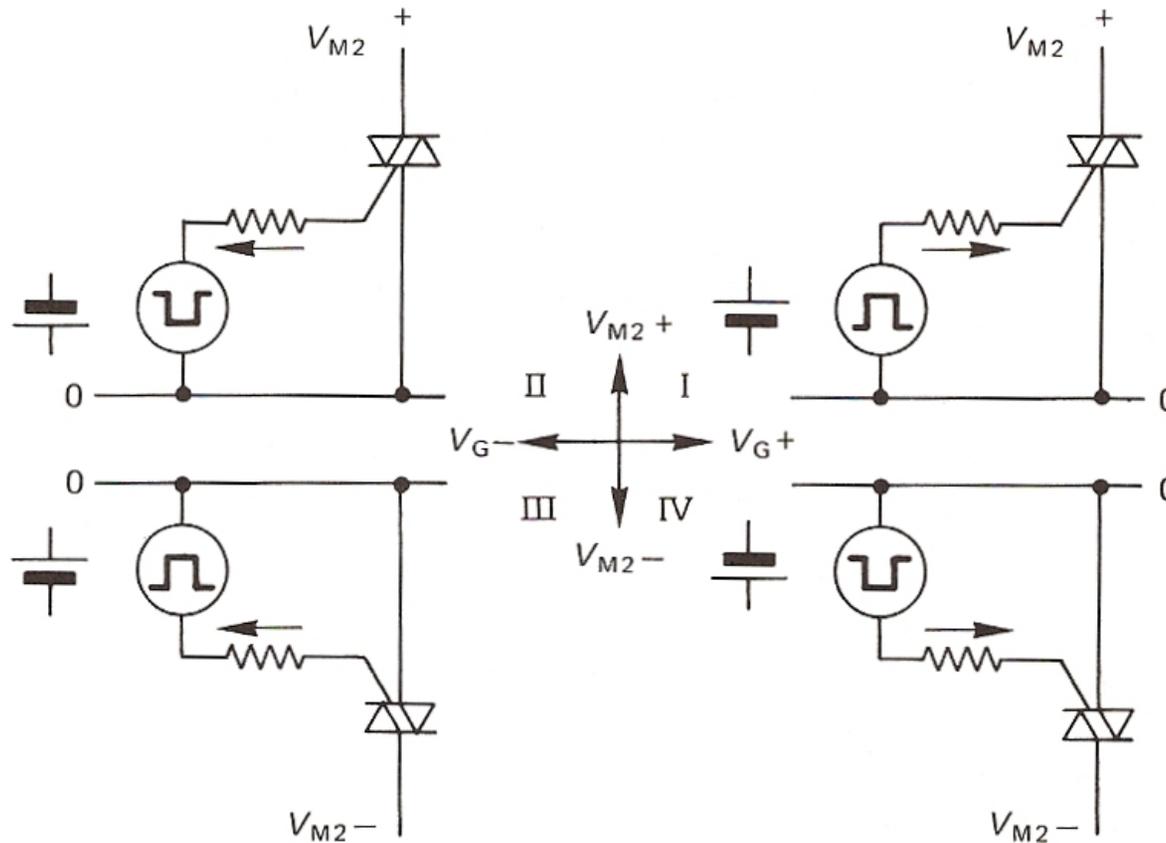
El terminal principal 2 (M2) es negativo respecto al M1 y la corriente de compuerta, negativa (saliente), polariza en directo la juntura p2-n3 (J4). Esto reduce el potencial en n1 haciendo que se inyecten huecos de la región p2 a la región n1, proporcionando corriente de base para el transistor equivalente p2-n1-p1, lo que activa el tiristor equivalente formado por las regiones p2-n1-p1-n4.

4.- Modo IV: Disparo en el cuarto cuadrante.



El terminal principal 2 (M2) es negativo respecto al M1 y la corriente de compuerta, positiva (entrante), polariza en directo la juntura p2-n2 (J3). Los electrones que se inyectan de n2 a p2 se difunden a n1, aumentando la polarización directa de J2 hasta que se activa el tiristor equivalente formado por las regiones p2-n1-p1-n4.

Sin hacer referencia a la operación interna, los modos de conducción del TRIAC se pueden resumir en este cuadro:



TRIAC: esquemas de disparo en cuatro cuadrantes.

Tabla resumen de las características de encendido y operación del TRIAC en los cuatro cuadrantes.

Cuadrante de operación	V_{MT2}	V_G	Notación	Sensibilidad al pulso de encendido
I	>0	>0	++	alta
II	>0	<0	+-	media
III	<0	<0	--	media
IV	<0	>0	-+	baja

La complejidad estructural necesaria para lograr la conducción bidireccional y la operación en los cuatro cuadrantes trae dos consecuencias que limitan el campo de aplicación de los TRIACs.

- 1.- La sensibilidad de disparo es distinta en cada cuadrante.

2.- El proceso de recombinación de los portadores es también complejo, y puede ser perturbado por la aplicación repentina de tensiones inversas, que normalmente hacen que el dispositivo entre inmediatamente en conducción en sentido contrario.

Esta situación es la normal cuando se trabaja en aplicaciones AC con cargas inductivas, lo que limita seriamente el campo de aplicación de los TRIACs a aplicaciones de conversión AC/AC pero con cargas básicamente resistivas.

MODELAJE DE TIRISTORES

Para la simulación digital circuital de los componentes semiconductores de potencia existen cuatro niveles de modelos:

A.- Modelo simplificado: Conmutador ideal controlado por corriente en serie con un diodo ideal. Cubre a todos los tipos de una clase de dispositivos, sin entrar en detalles como, por ejemplo, corrientes o tensiones máximas, tensiones en conducción, ganancias de voltaje/corriente, tiempos de conmutación, etc. Ofrece resultados rápidos que permiten determinar la validez de la topología propuesta, la operación del sistema y sus respuestas a las señales de control, sin entrar en detalles sobre características de conmutación, potencia disipada, etc.

Los modelos de los componentes en el programa PSIM son generalmente de este nivel.

B.- Modelos circuitales precisos. El comportamiento del dispositivo se modela mediante una estructura circuital lo mas cercana posible al dispositivo real, buscando el mayor grado de precisión posible. Para esto es necesario tener un modelo "personalizado" que, idealmente, especifique todos los parámetros del dispositivo.

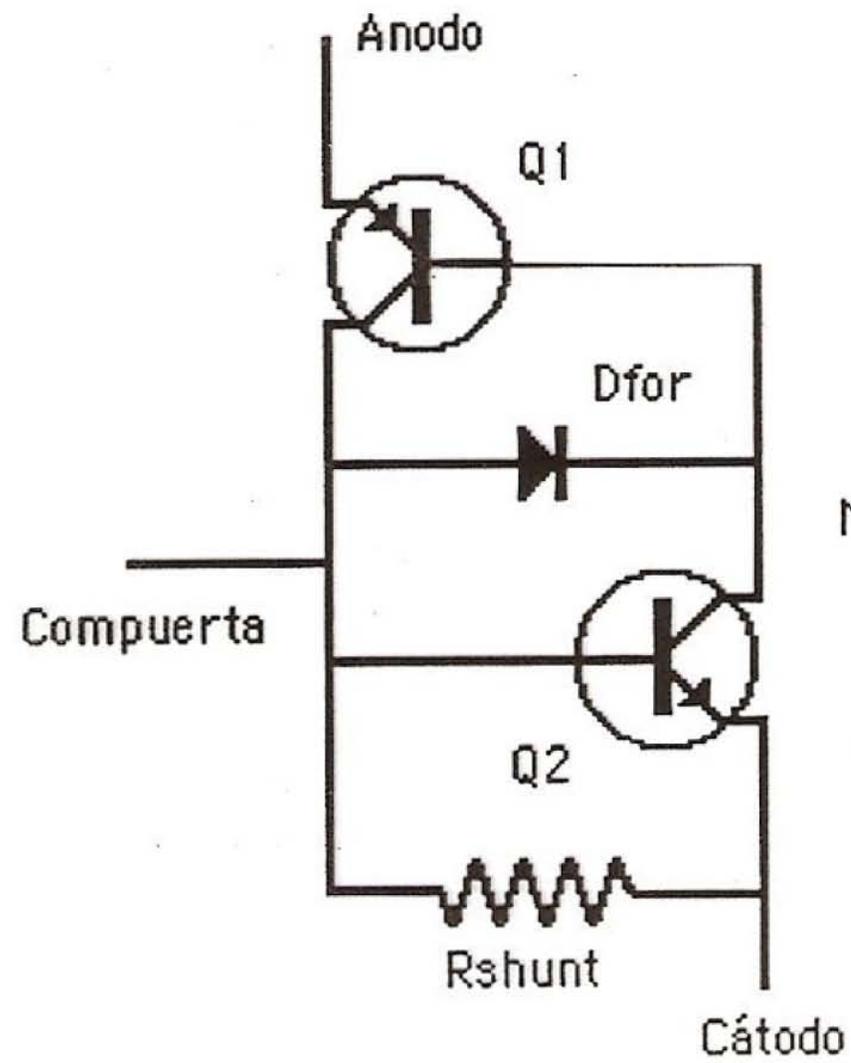
Idealmente el modelo correspondiente debe ser proporcionado por el fabricante del dispositivo para lograr la máxima precisión.

En principio, si el modelo es suficientemente detallado, ha sido personalizado con precisión para el tipo exacto de dispositivo empleados y se han caracterizado los valores parásitos del circuito, los resultados obtenidos son básicamente iguales a los medidos en el Laboratorio

La máquina de cálculo de muchos de estos programas se basa en el programa SPICE ("Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis") desarrollado en la Universidad de Berkeley en 1973.

La implementación del modelo del dispositivo no es necesariamente única. Por ejemplo, existen por lo menos tres aproximaciones básicamente distintas al modelaje de un tiristor en SPICE.

1.- Modelo de los dos transistores (modelo circuital).

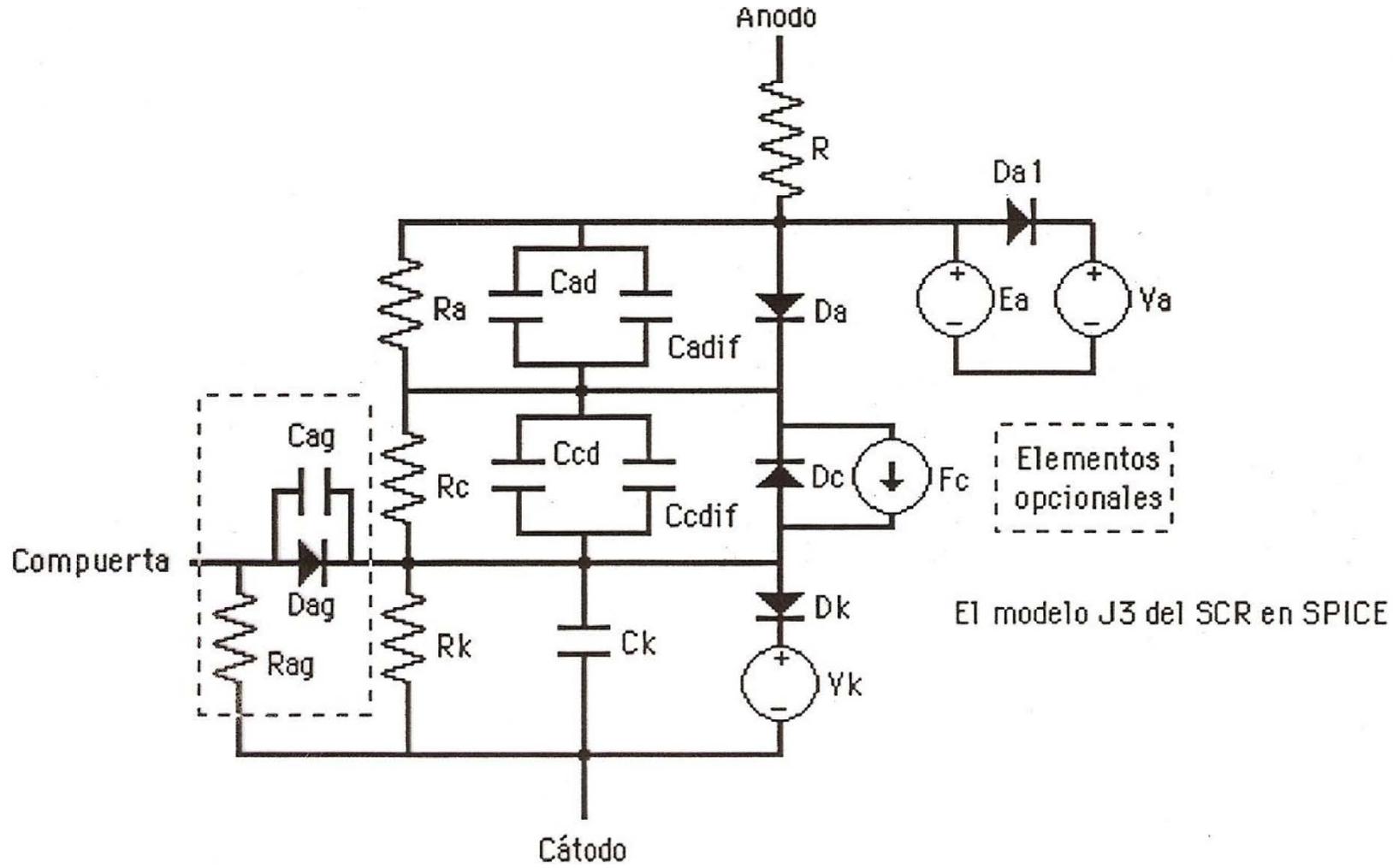


Modelo de dos transistores del SCR, según Hu y Ki.

Listado en SPICE del modelo circuital (dos transistores) del SCR

```
.SUBCKT "SCR" 1 2 3
*NODO 1 TERMINAL DE ANODO
*NODO 2 TERMINAL DE COMPUERTA
*NODO 3 TERMINAL DE CATODO
QPNP 2 4 1 QPNP
QNPN 4 2 3 QNPN
D1 2 4 D1
RSHUNT 2 3 [RSHUNT]
.MODEL QPNP PNP (TF=[] TR=[] CJC=[] CJE=[] XTB=[]
+ IS=[] ISE=[] NE=[] BF=[] BR=[] ISC=[] NC=[] RE=[])
.MODEL QNPN NPN (TF=[] TR=[] CJC=[] CJE=[] XTB=[]
+ IS=[] ISE=[] NE=[] BF=[] BR=[] ISC=[] NC=[] RE=[])
.MODEL 1 DIODE (IS=[] RS=[] TT=[] CJO=[] BV=[] IBV=[])
.ENDS
```

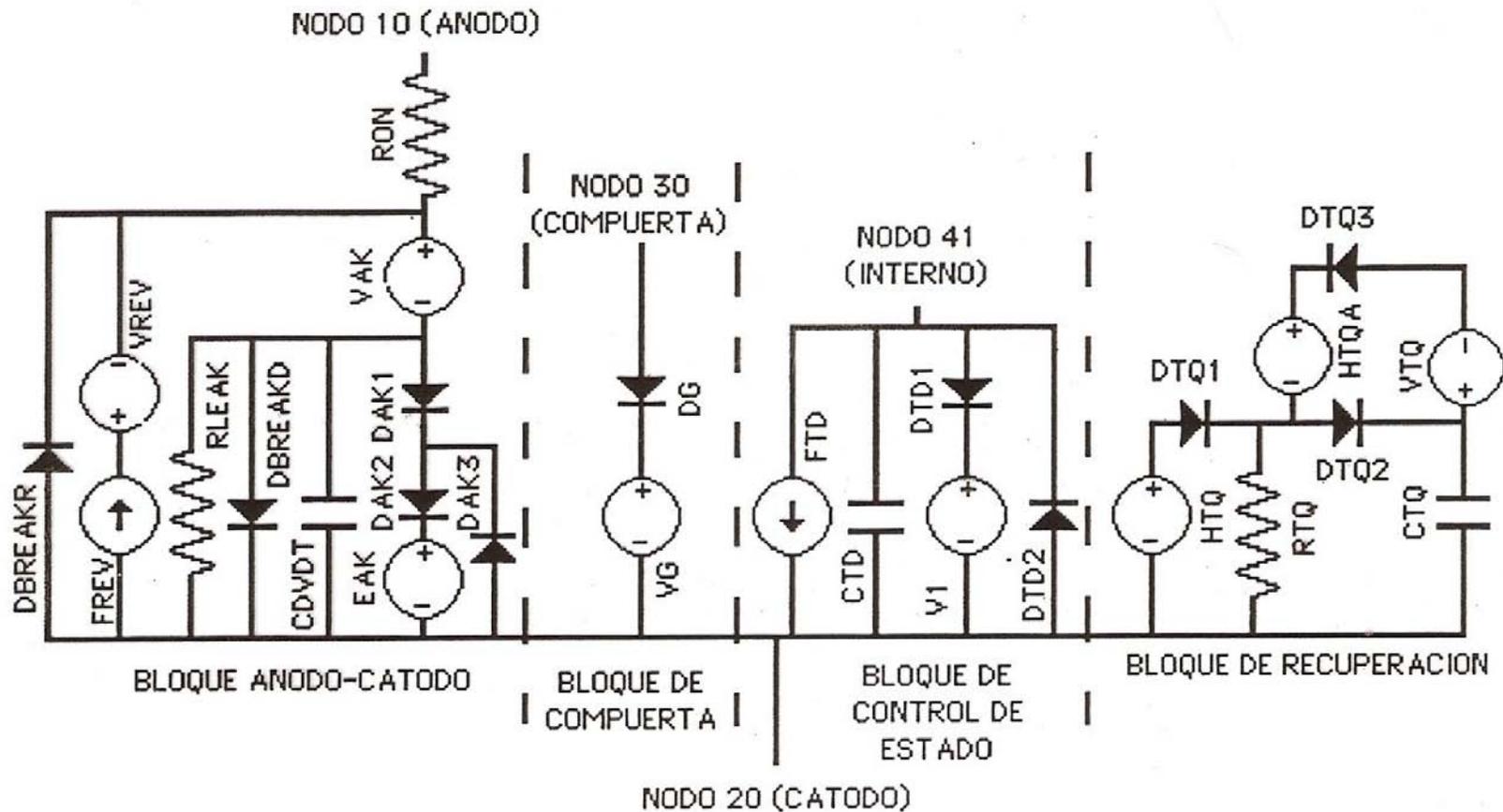
2.- Modelo de las tres junturas (modelo estructural)



Listado en SPICE del modelo J3 del SCR como subcircuito

```
.SUBCKT "SCR" 1 2 3
*NODO 1 TERMINAL DE ANODO
*NODO 2 TERMINAL DE COMPUERTA
*NODO 3 TERMINAL DE CATODO
R 1 4 [R]
RA 4 5 [RA]
RC 5 9 [RC]
RK 9 3 [RK]
DAI 4 6 DAI IC=OFF
.MODEL DAI D (IS=[ISA])
EA 4 8 4 5 1.
VA 6 8 0.
VK 7 3 0.
DA 4 5 DA IC=OFF
DC 9 5 DC
FC 5 9 POLY(2) VA VK 0. [ $\alpha_A$ ] [ $\alpha_K$ ]
DK 9 7 DK IC=OFF
CK 9 3 [CK]
*COMPUERTA AMPLIFICADORA
DAG 2 9 DAG
RAG 2 3 [RAG]
*
.MODEL DA D (IS=[ISA], CJO=[CADEPLO], TT=[ $\tau_A$ ], BV=[BVJA])
.MODEL DC D (IS=[ISC], CJO=[CCDEPLO], TT=[ $\tau_C$ ], BV=[BVJC])
.MODEL DK D (IS=[ISK], BV=[BVJK])
.MODEL DAG D (IS=[ISDAG])
.ENDS
```

3.- Modelo de bloques funcionales equivalentes (“macromodelo”)



Nuevo macromodelo propuesto para el SCR.

Listado en SPICE del macromodelo del SCR como subcircuito

```
.SUBCKT SCR 10 20 30
*NODO 10 TERMINAL DE ANODO
*NODO 20 TERMINAL DE CATODO
*NODO 30 TERMINAL DE COMPUERTA
*BLOQUE PRINCIPAL ANODO-CATODO
RON 10 11 []
VAK 11 12 DC 0
DAK1 12 13 DI
DAK2 13 14 DMOD
EAK 14 20 POLY(2) 10 20 41 20 0 0 0 0 1
DAK3 20 13 DI
CDVDT 12 20 []
RLEAK 12 20 []
DBREAKD 12 20 DBREAKD
DBREAKR 20 11 DBREAKR
VREV 15 11 DC 0
FREV 20 15 VTQ []
***
*BLOQUE DE COMPUERTA
DG 30 31 DG
VG 31 20 DC []
***
BLOQUE DE CONTROL DE ESTADO
FTD 41 20 POLY(3) VG VAK VREV [] [] [1] [1]
CTD 41 20 []
V1 42 20 DC [2]
DTD1 41 42 DI
DTD2 20 41 DI
***
BLOQUE DE RECUPERACION
HTQ 51 20 VAK [1]
DTQ1 51 52 DI
RTQ 52 20 [100HM]
DTQ2 52 53 DI
CTQ 53 20 []
VTQ 53 54 DC 0
DTQ3 54 55 DI
HTQA 55 52 VAK [50]
***
.MODEL DMOD D [RS]
.MODEL DG D [IS]
.MODEL DBREAKD D [N] [IS]
.MODEL DBREAKR D [N] [IS]
.MODEL DI D
.ENDS
```