

# MODELADO DE TIRISTORES MEDIANTE SIMULACIÓN ELÉCTRICA

Alberto Yúfera, Miguel A. Humanes y Antonio Rojas  
Departamento de Tecnología Electrónica, Universidad de Sevilla,  
C/ Virgen de África 7, Sevilla 41012, España.  
Tf: 34 5 4552836, Fax: 34 5 4552833  
email: yufera@cnm.us.es

**RESUMEN.-** En este resumen se presenta un método sistemático para el modelado y simulación de Tiristores (SCR) a nivel eléctrico. El método se basa en el ajuste del comportamiento de SRCs a partir de un modelo parametrizado. El procedimiento de ajuste parte de un análisis de sensibilidad de las características del tiristor respecto de los parámetros del modelo propuesto, para derivar una secuencia de pasos que permite ajustar las características del SCR. Usando el simulador eléctrico PSPICE, el método propuesto ha sido validado con dos SCR comerciales.

## 1. INTRODUCCIÓN

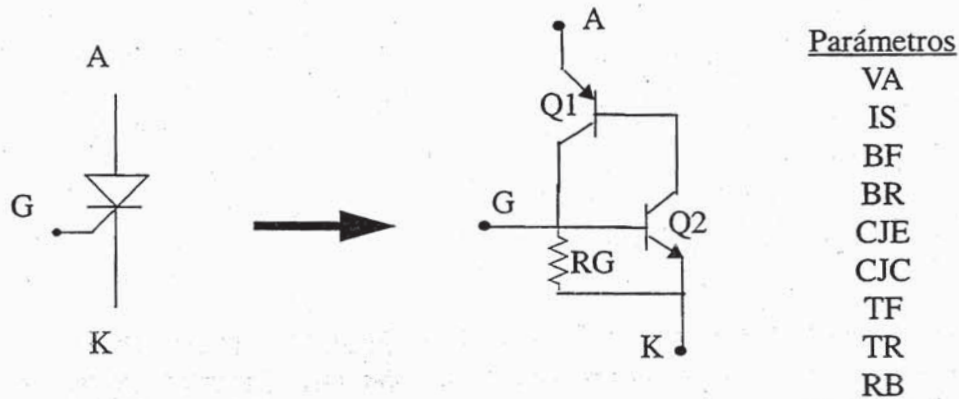
En la actualidad, el uso de tiristores en circuitos de potencia se encuentra ampliamente extendido. Su progresiva implantación se debe a sus excelentes cualidades como interruptor: fiabilidad, robustez, bajo consumo de potencia, elevadas potencias manejadas, etc, así como a la evolución tecnológica provocada por el desarrollo de los dispositivos semiconductores. En el contexto del diseño de circuitos de potencia, la prueba o test en condiciones reales plantea diversos problemas, sobre todo a nivel económico y técnico. La simulación de circuitos que incorporan componentes electrónicos permite la posibilidad de efectuar tales test, evitando la necesidad de implementar un prototipo real. Este hecho repercute, no solo en una reducción del coste, sino del tiempo de diseño. No obstante, para garantizar una simulación eléctrica eficiente se requieren modelos correctos de cada uno de los componentes del circuito de potencia. En este trabajo nos hemos planteado un procedimiento para obtener un modelo del SCR apto para su simulación a nivel eléctrico, partiendo de las especificaciones descritas en las hojas de catálogo. De este modo, el procedimiento es aplicable a cualquier tiristor comercial, cubriendo aspectos de modelado que habitualmente no son contemplados por las herramientas de CAD disponibles para el análisis de circuitos.

Este trabajo está organizado del siguiente modo: En la sección 2 se describen tanto las características eléctricas de los SCR que se van a ajustar, como el modelo y los parámetros que se van a utilizar para ello. En el apartado 3 se estudian las curvas de sensibilidad respecto de estos parámetros. En la sección 4 se describe el procedimiento seguido para el ajuste de

tales características, aportando ejemplos prácticos con tiristores comerciales. En la sección 5 se enuncian las conclusiones más relevantes del trabajo.

## 2. MODELO DEL SCR

El punto de partida para el proceso de modelado es un circuito parametrizado. El modelo propuesto para el SCR está basado en la conexión de dos transistores bipolares más una resistencia entre los terminales de puerta y cátodo [1,2]. En la Figura 1 aparece dicho modelo, así como los parámetros del modelo eléctrico utilizado por PSPICE que han sido seleccionados para su caracterización.



**Figura 1.-** Modelo seleccionado para el SCR y los parámetros que lo describen.

Los parámetros del modelo son los siguientes:

VA:	Tensión Early de los transistores bipolares en zona activa.
IS:	Intensidad inversa de saturación en los diodos de unión.
BF:	Ganancia en intensidad en la región activa directa.
BR:	Ganancia en intensidad en la región activa inversa.
CJE:	Capacidad de la unión Base-Emisor.
CJC:	Capacidad de la unión Base-Colector.
TF:	Tiempo de transito de los portadores en la base en modo activo directo.
TR:	Tiempo de transito de los portadores en la base en modo activo inverso.
RB:	Resistencia de base de los transistores bipolares.

En el método seguido se han tomado iguales las características de los transistores NPN y PNP, en orden a reducir el número de variables y facilitar el proceso de ajuste. Teniendo en cuenta el análisis del modelo a nivel eléctrico, el nivel de partida viene dado por los modelos clásicos de Ebers-Moll y Gummel and Poon para el transistor bipolar [3].

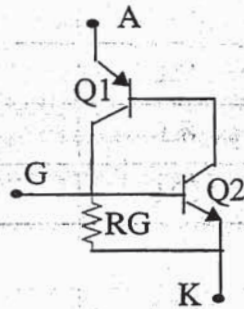
Las características eléctricas correspondientes que se desean ajustar para el tiristor son:

IH:	Intensidad de mantenimiento.
VBO:	Tensión de ruptura directa.
dVAK/dt:	Máxima derivada de la tensión ánodo-cátodo.
TON:	Tiempo de disparo.
TOFF:	Tiempo de apagado.
VT:	Tensión en conducción.
IGT:	Intensidad mínima de puerta con disparo seguro.
VGT:	Tensión puerta-cátodo mínima con disparo seguro.

Entre estas características, algunas son estáticas ( $I_H, V_{BO}, V_T$ ) y otras dinámicas ( $dV_{AK}/dt, T_{ON}, T_{OFF}$ ). El proceso de simulación y ajuste que se describe a continuación resuelve el problema de forma global, sin diferenciar entre ambas, buscando las relaciones de sensibilidad entre los parámetros del modelo y las características eléctricas del SCR, con independencias de su naturaleza.

### 3. SIMULACIÓN DEL MODELO

En el procedimiento de simulación del modelo propuesto en la Figura 1, hemos buscado, en primer lugar, la reproducción mediante simulación eléctrica de las condiciones de test de cada una de las características del SCR [4]. Una vez definido el *set-up* de medida para cada característica, hemos efectuado simulaciones con PSPICE [3], buscando: 1) la relación de dependencia entre los parámetros del modelo y dichas características y 2) la cuantificación de las sensibilidades encontradas en orden a establecer prioridades en el ajuste de los parámetros del modelo. Los parámetros de partida del modelo se describen en la Figura 2. Se han tomado valores típicos para los mismos. Incrementado y decrementando los parámetros de dicho modelo, hemos obtenido una serie de curvas de diseño para el ajuste de las características del tiristor. A continuación pasamos a describirlas.



#### Parámetros

$V_A = 10V$   $I_S = 1.0E-13A$   
 $BF = 20$   $BR = 0.1$   
 $CJE = 2pF$   $CJC = 2pF$   
 $TF = 100ns$   $TR = 3\mu s$   
 $RB = 1\Omega$

Figura 2.- Parámetros de partida para el modelo propuesto del SCR.

En la Figura 3 se muestra la evolución de  $V_{BO}$  frente a  $BF$ , con  $I_S$  y  $R_G$  como parámetros. Se aprecia como un incremento en  $BF$ ,  $I_S$  y  $R_G$  repercute en un decremento de la tensión de ruptura directa. Esta dependencia es mayor para  $BF$  que para  $I_S$ . En la Figura 4 se aprecia la dependencia de la tensión ánodo-cátodo en conducción,  $V_T$ , con  $R_B$ . Las Figura 5 y 6

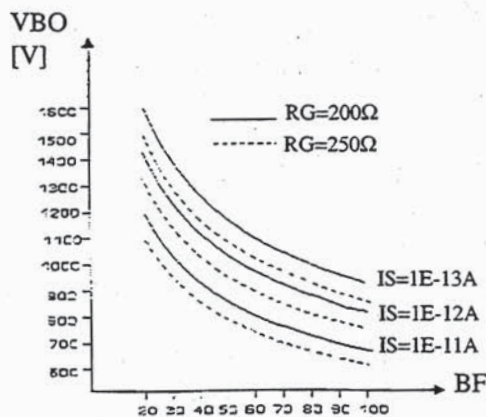


Figura 3.- Evolución de  $V_{BO}$ , respecto de  $BF$ ,  $R_G$  e  $I_S$ , como parámetros.

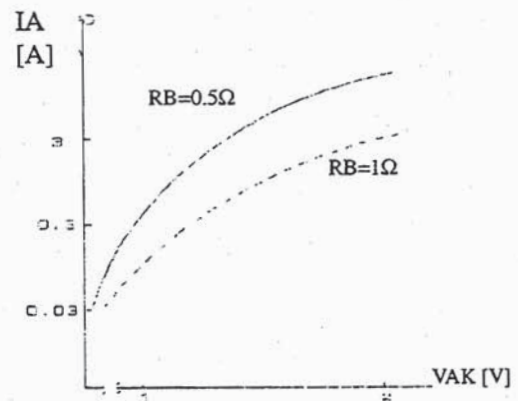
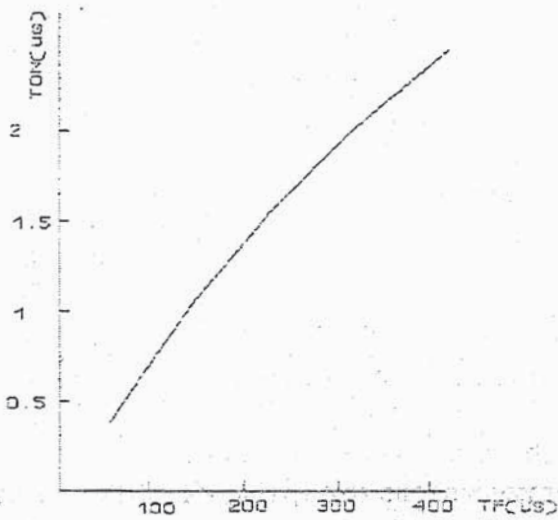
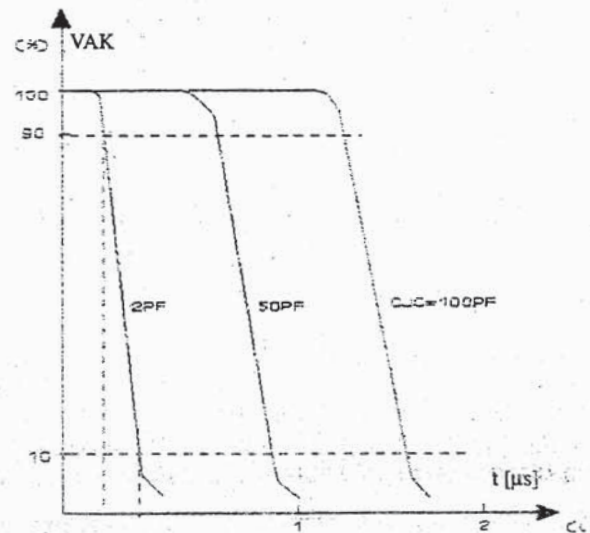


Figura 4.- Evolución de  $I_A$ - $V_{AK}$  con  $R_B$  como parámetro.

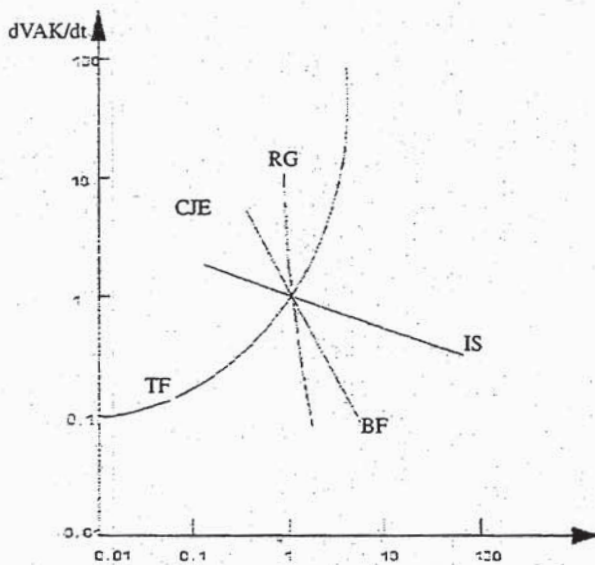
muestran como el tiempo de encendido sobre una carga puramente resistiva es mucho más dependiente de TF que de la capacidad CJC. La Figura 6 muestra la forma de onda de la tensión ánodo-cátodo, sobre la cual se define el tiempo de encendido. Una de las características que aparece ser más dependiente de los parámetros del modelo es  $dV_{AK}/dt$ , mostrada en la Figura 7. Esta magnitud es función de TF, CJC, RG, BF e IS. Por último, también hemos incluido la dependencia de del tiempo de apagado, TOFF, respecto de los parámetros del modelo en la Figura 8.



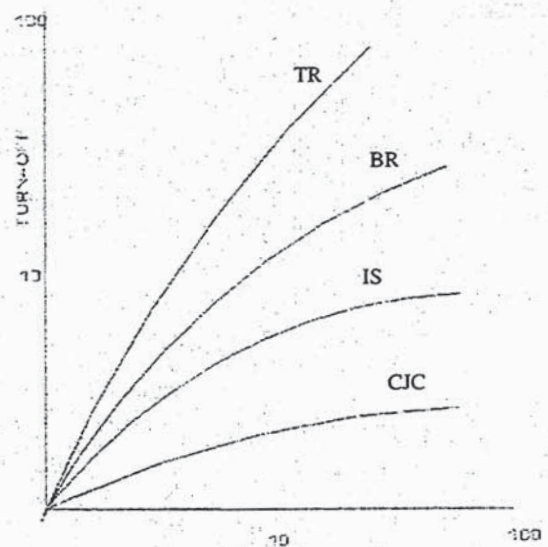
**Figura 5.-** Evolución del tiempo de encendido con el tiempo de tránsito en zona activa directa.



**Figura 6.-** Evolución de la tensión ánodo-cátodo con la capacidad base-colector.



**Figura 7.-** Evolución de la derivada máxima de la tensión ánodo-cátodo.



**Figura 8.-** Evolución del tiempo de apagado, normalizado.

#### 4. PROCEDIMIENTO DE AJUSTE

El conjunto de dependencias de las características del tiristor respecto de los parámetros del circuito se resume en la Tabla I. Puede observarse la dependencia multiparamétrica entre las características del tiristor y los parámetros del modelo. Algunos de estos influyen simultáneamente en diversas características, lo cual ha sido tenido en cuenta en el proceso de asignación de parámetros del modelo. El asignamiento de valores a los parámetros del modelo se ha realizado a la vez en los dos transistores bipolares. Asimismo, los valores de RG y VA se han tomado como constantes desde el principio: RG debido a la elevada sensibilidad de IS y BF, de modo que una vez fijada, tiene escaso margen de variación. Por otro lado, se ha observado que la dependencia de VA es similar a la de BF, de modo que se ha eliminado del proceso de asignamiento de parámetros para reducir su número.

**Tabla I** .- Dependencia de las características eléctricas del tiristor respecto de los parámetros del modelo propuesto.

	RG( $\uparrow$ )	IS( $\uparrow$ )	BF( $\uparrow$ )	TF( $\uparrow$ )	CJE( $\uparrow$ ) CJC( $\uparrow$ )	TR( $\uparrow$ )	RB( $\uparrow$ )
VBO	↓	↓	↓	=	=	=	=
IH	↓	↓	↓	=	=	=	=
IGT, VGT	↓	↓	↓	=	=	=	=
TON	↓	=	=	↑	↑	=	=
dV/dt	↓	↓	↓	↑	↓	=	=
TOFF	=	↓	=	=	↑	↑	=
VT	=	↓	↓	=	=	=	↑

Las curvas de diseño, así como las dependencias expresadas en la Tabla I, nos han permitido poner a punto un procedimiento de ajuste de los parámetros que garantiza el correcto modelado del SCR. Podemos resumirlo en la siguiente secuencia de pasos:

**Paso 1:** Se ajustan  $I_H^1$  y VBO, modificando los parámetros IS y BF.

**Paso 2:** Se ajusta el impulso de disparo IGT. Dado que RG tiene un valor fijo, este ajuste se realiza mediante una fuente de intensidad controlada por intensidad (FICI), con una determinada ganancia, lo cual implica añadir un elemento de circuito más al modelo. Se verifica asimismo el valor de VGT.

**Paso 3:** Se ajusta el tiempo de encendido TON mediante TF.

**Paso 4:** Se ajusta dVAK/dt con CJC. La influencia de CJC es muy baja, por lo que la distorsión sobre TON, previamente ajustado, es reducida. No obstante, es necesario comprobarla.

1. Si el valor de  $I_H$  es muy elevado, se pueden colocar en paralelo varios modelos para incrementar el área de trabajo de los transistores.

**Paso 5:** Mediante TR se ajusta el tiempo de apagado, TOFF.

**Paso 6:** VT se ajusta finalmente con RB.

Los resultados obtenidos para dos SCR comerciales (BT179-1000R de Phillips y S30EF de International Rectifier) se muestran en la Tabla II. Se puede apreciar como la aproximación de las características obtenidas a las reales es muy aceptable. El tiempo empleado para realizar ambos ajustes ha sido, en ambos casos, inferior a una hora.

**Tabla II .-** Resultados obtenidos para dos tiristores comerciales.

	BT179-1000R		S30EF	
	DATA SHEET	MODELO	DATA SHEET	MODELO
VBO [V]	1130	1110	800	820
IH [mA]	75	75.7	90	93
IGT [mA]	30	31.5	70	71.15
VGT [V]	1.5	1.2	1.2	1.46
TON [ $\mu$ s]	2	1.8	1.5	1.3
dV/dt [V/ $\mu$ s]	200	140	700	560
TOFF [ $\mu$ s]	35	34	12	11.5
VT [V]	2	1.83	2.15	2.1

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha descrito un procedimiento para obtener modelos de tiristores adecuados para su simulación eléctrica con PSPICE. El análisis de las interdependencias entre los parámetros del modelo utilizado y las características eléctricas del tiristor ha permitido establecer una metodología de dimensionamiento del modelo que garantiza el éxito del proceso. Los resultados obtenidos con dos tiristores comerciales avalan la viabilidad del procedimiento presentado en este trabajo.

## 6. REFERENCIAS

- [1] P. Antognetti and G. Massobrio: "Thyristor model for CAD applications". Proc. Journées d'Electronique, Lausanne, Suiza. Oct. 1977.
- [2] R. Raghuran : "Computer Simulation of Electronic Circuits". Indian Institute of Technology, Kanpur. India. John Wiley & Sons. 1989.
- [3] Microsim Corporation: "Pspice User's Manual". Irvine, California, 1989.
- [4] Miguel A. Humanes y Antonio Rojas: "Caracterización de dispositivos de potencia mediante simulación eléctrica". Proyecto Fin de Carrera. Escuela Universitaria Politécnica de Sevilla, 1995.