

# MODELADO Y SIMULACION DE CONVERTIDORES ESTATICOS EN LA ENSEÑANZA DE LA ELECTRONICA DE POTENCIA.

Moreno Muñoz, A.; Plaza Alonso, A.; Romero Gómez, D. Fernández  
Chaichío, R. y Pallarés V.

Universidad de Córdoba  
Escuela Universitaria Politécnica  
Dpto. Electrotécnica y Electrónica  
Avda./ Menéndez Pidal s/n 14071 Córdoba.

Tfno: (957) 21 83 73

Fax: (957) 21 83 16

## RESUMEN

*En el presente artículo se describe una nueva herramienta informática destinada a la enseñanza y centrada en el funcionamiento de los equipos más usuales en la electrónica de potencia. La simulación por ordenador de estos equipos, altamente no lineales, presenta una gran dificultad, superada por la utilización de programas gráficos de programación. Con esto se permite al usuario crear sus propios simulaciones a partir de los modelos que se han incorporado, pudiendo elegir tanto el algoritmo, como los parámetros temporales, ofreciéndose un entorno abierto para la enseñanza de la electrónica de potencia.*

## 1.-INTRODUCCIÓN.

Debido al desarrollo experimentado por los semiconductores en los últimos veinte años, la utilización de los convertidores estáticos de potencia se ha extendido a todo tipo de actividades. La extensa diversidad de configuraciones en electrónica de potencia (que se ve continuamente incrementada, con la aparición de nuevas aplicaciones o nuevos dispositivos semiconductores), ha tenido como consecuencia que una aproximación generalizada y uniforme de éstos, independientemente de la topología o los semiconductores empleados, se haya impuesto como una necesidad tanto para el diseñador como en los planes de estudio de las escuelas técnicas. Esto también ha llevado a la elaboración de herramientas software de simulación y diseño asistido por ordenador, que aunque ya eran muy usadas en otras áreas de la ingeniería, aquí no habían sido suficientemente usadas, en favor del desarrollo de prototipos a pequeña escala.

Así, el trabajo ha sido abordado desde un punto de vista macroscópico, acercándonos al convertidor electrónico como sistema dinámico general, en el que los diversos semiconductores actúan como polos [1] de potencia que enlazan las fuentes de entrada con las posibles cargas. Así será posible la observación del comportamiento real del convertidor siendo parte integrante de sistemas eléctricos de mayor envergadura como equipos de variación de velocidad de motores eléctricos o equipos de control de posición en máquinas herramientas.

## 2.-GENERALIDADES SOBRE LOS CONVERTIDORES.

Numéricamente hablando cualquier sistema que contenga un convertidor se define como un sistema de ecuaciones algebraicas y diferenciales (que integraremos: Euler, Runge-Kutta 5 o Adams/Gear han sido empleados en este estudio). Nuestro convertidor será fundamentalmente un sistema no lineal de ecuaciones, lo cual nos obliga a un control temporal preciso.

Desde un punto de vista eléctrico sólo existe un tipo de intercambio de energía, que es de alterna polifásica a alterna polifásica. Como se hacen necesarias otras modalidades de conversión, estableceremos éstas como restricciones del caso general; así tendremos la siguiente tabla:

POLIFASICO C.A	POLIFASICO C.A
Restricción entrada una fase 1 Fase C.A./ Polifásico C.A. CC/ Polifásico CA CC/ Monofásico CA	Restricción salida una fase Polifásico C.A./ 1 Fase C.A. Polifásico CA/ CC Monofásico CA/ CC
Restricción máxima CC	CC Restricción Máxima

Tabla 1. Modalidades de conversión.

Es preciso, en este momento, distinguir entre dos tipos fundamentales de convertidores: convertidores con matriz de conversión y convertidores de modos conmutados [2].

Los *Convertidores con matriz de conversión*, son aquellos que pueden ser representados como una matriz de polos de potencia como la de la figura. La función de conversión está formada por la sucesiva conexión de un único interruptor ideal entre cada una de las  $m$  fases de entrada con cada una de las  $n$  fases de salida. En caso contrario, como consecuencia de la ley de Kirchoff, dos o más entradas estarían cortocircuitadas entre sí. La tensión de salida en cada fase estará compuesta de sucesivos tramos de cada una de las  $m$  tensiones de entrada.

Esto nos lleva a la conclusión de que la secuencia de cierre de los interruptores para cada una de las fases, consistirá en el desplazamiento en el tiempo de la correspondiente a una de las fases, siempre que sea un conjunto polifásico equilibrado.



Por lo tanto tenemos un conjunto de tensiones de salida dependientes de dos factores: tensiones de entrada y secuencia de cierre de los interruptores. Lógicamente las corrientes que circulan por cada una de las fases de salida estarán determinadas por las tensiones de salida y por las cargas conectadas entre ellas.

Cada línea de entrada está conectada por otra parte a  $n$  interruptores que la unen a una línea de salida, por lo que la intensidad estará formada por los tramos de cada una de las intensidades de salida. Dos o más de los  $n$  interruptores pueden estar cerrados a la vez, pero al menos uno de los  $m$  debe estarlo, para que circule por él la intensidad, como consecuencia de la segunda ley de Kirchoff. Las intensidades de entrada son así magnitudes dependientes.

Anteriormente se ha supuesto que la potencia circulaba de la entrada a la salida, pero también podría suceder a la inversa, actuando la carga como fuente de energía y la tensión de entrada como receptora. La matriz de conversión no definen la dirección de circulación de la energía. La frecuencia de las tensiones dependientes de salida, formados mediante tramos de las tensiones de entrada, depende solamente de la secuencia de cierre de los interruptores ideales.

Los *Convertidores de modos conmutados* responden a un principio de funcionamiento distinto. La presencia de reactancias y condensadores entre las fuentes de entrada y la salida hace que la tensión de salida no esté formada por sucesivos tramos de la tensión de entradas. Podemos decir que los polos conmutan al circuito entre diversos modos de funcionamiento [3].

### 3. FUNCIONES DE EXISTENCIA DE LOS CONVERTIDORES DE POTENCIA.

Como hemos dicho, si cada convertidor es considerado como una matriz  $M \times N$  de interruptores, *matriz de conversión*. Cada interruptor se define [1] mediante un tren de impulsos unitarios y está representado por su función existencial  $H_{ij}$ . Si el polo o interruptor está cerrado (impulso 1), la tensión de salida  $V_j$  será igual a  $V_i$  de entrada, por lo que:

$$V_j = H_{ij} * I_j + \text{contribución otros polos}, \quad [1]$$

de forma similar

$$I_i = H_{ij} * I_j + \text{contribución otros polos}. \quad [2]$$

$$V_{sj} = \sum_{i=1}^{i=N} H_{ij} * V_{ei} \quad [3]$$

$$I_j = \sum_{j=1}^{j=M} H_{ij} * I_{sj} \quad [4]$$

Por lo que si las escribimos de forma matricial:

$$(V_s) = (H)^T (V_e) \quad [5]$$

$$(I_e) = (H) (I_s) \quad [6]$$

$$H_{ij} = + \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{2}{\pi n} \text{sen}\left(\frac{n\pi}{K}\right) \cos(n\omega t) \quad [7]$$

donde:

$$\frac{1}{K} = \frac{T_{on}}{T} \quad [8]$$

Suponiendo un tren de impulsos con un periodo de repetición T y una duración de su valor unitario A, como el representado en la figura, el desarrollo en serie de la función de existencia será [1]:

Puede ser modulada en:

- a) Modulación en anchura de impulso, mediante el control de K, para convertidores CC/CC, CA/CC y CC/CA.
- b) Frecuencia del tren de impulsos.
- c) Desplazamiento de fase: convertidores CA/CC y CA/CA.

Una vez determinado el tipo de convertidor y las magnitudes de entrada, la salida de entrada dependerá de la secuencia de disparo de los interruptores. Veamos a continuación como se han desarrollado varios de los modelos de convertidores.

### 3. CONVERTIDORES CA/CC

Para crear uno de estos modelos hemos considerado en convertidor de corriente en estrella trifásica que alimenta una carga R L E), no tendremos en cuenta inicialmente el fenómeno de la conmutación ( $L_c=0$ ), ni pérdidas resistivas ni inductivas de la alimentación, supondremos los tiristores como dispositivos semiconductores ideales, régimen de funcionamiento en conducción continua. Una vez hemos determinado la forma de onda de la tensión que aplica la matriz de conversión a la carga, procedemos a implementarla mediante los bloques de que dispone simulink. Por lo general se ha empleado el bloque Function (figura 1):

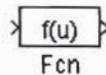


Figura 1. Bloque función de Simulink.

En él se introduce la siguiente expresión:

$$\sqrt{2} * V_f * \sin(\omega t + x_{or} + x_{ar} - d_r * \text{floor}(u/d_s)) - E \quad [9]$$



donde

$V_f$ : tensión eficaz de fase de la fuente de alimentación (senoidal, 50 Hz).

$w$ : pulsación ( $100 * \pi$  rd/s).

$u$ : vector de entrada al bloque Fcn; en este caso, el tiempo  $t$ .

$xor$ : traslada el eje de referencia Y al punto donde dos ondas senoidales consecutivas interseccionan.

$xar$ : ángulo de encendido en radianes.

$dr$ : intervalo en radianes durante el que un tiristor está conduciendo, suponiendo conducción continua.

$ds$ : idéntico al anterior pero medido en segundos.

$dr * floor(t/ds)$ : función escalón. *Floor* es una función de Simulink que realiza un redondeo a - infinito. Al introducir este término en la expresión [9] se consigue que cada  $dr$  radianes, el siguiente seno que calcula, esté desfasado  $dr$  radianes respecto al anterior.

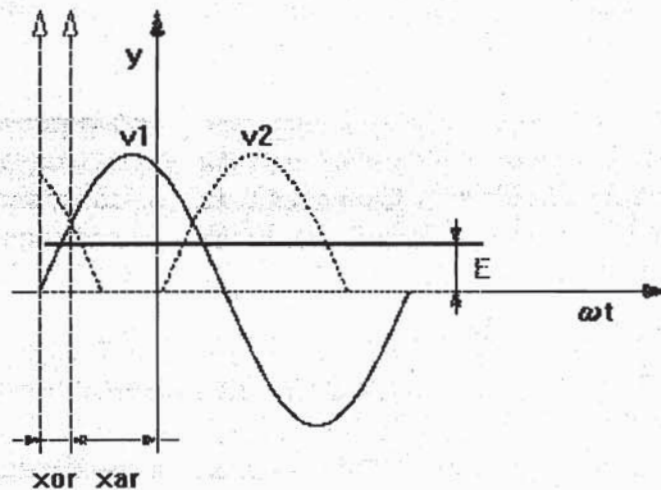


Figura 2. Definición gráfica de los ángulos de corte y disparo

El modelo quedará entonces como sigue:

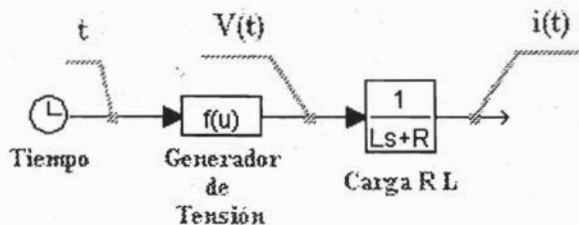


Figura 3. Modelo del convertidor ca/cc para conducción continua.

En el caso de conducción discontinua, que tiene lugar cuando la corriente en la carga se hace cero antes de que el siguiente tiristor sea disparado, habrá que realimentar la intensidad e imponer, mediante una nueva función, que la tensión en la carga R L sea nula cuando la corriente esté bloqueada. De esta forma el modelo quedará finalmente como sigue (fig 4):

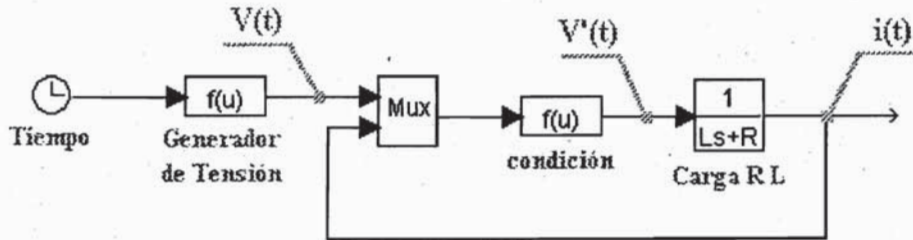


Figura 4. Modelo completo del convertidor ca/cc

Debido al modo de operar de Simulink, este modelo requiere algunas modificaciones para un correcto funcionamiento de tal forma que el modelo final simule el funcionamiento real y no ideal del convertidor o cualquier otro equipo electrónico.

Se pretende que el modelo sea lo más interactivo posible y que el usuario pueda definir un equipo con unas características muy distintas a las que habitualmente se presentan en los procesos industriales. En la figura 5 se muestran los resultados gráficos obtenidos en la simulación del modelo descrito anteriormente, añadiéndose además el fenómeno de la conmutación:

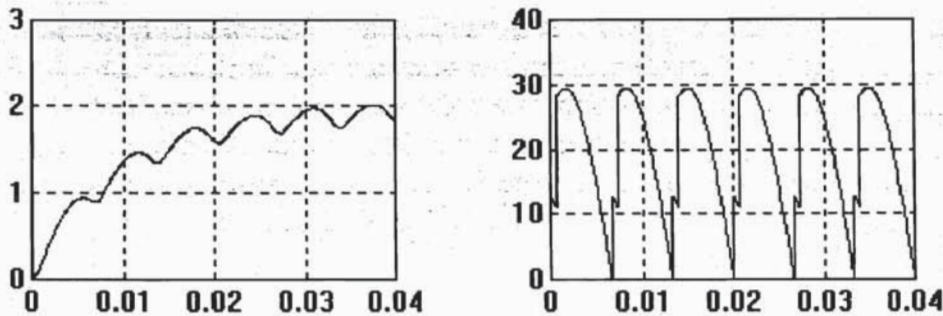


Figura 5. Gráficas de tensión (V) e intensidad (A) en la carga-tiempo (s).

#### 4. CONTROL DEL MOTOR ASINCRONO TRIFASICO CON PWM

Para la realización del modelo del motor asíncrono se ha seguido la *teoría de campo orientado* [7]; con la que se consigue simular el funcionamiento dinámico del motor, siguiendo las ecuaciones siguientes:



$$\begin{pmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{qr} \\ v_{dr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s + sL_s & w_e L_s & sL_m & w_e L_m \\ -w_e L_s & R_s + sL_s & -w_e L_s & sL_m \\ sL_s & (w_e - w_r)L_m & R_r + sL_r & (w_e - w_r)L_r \\ -(w_e - w_r)L_m & sL_m & -(w_e - w_r)L_r & R_r + sL_r \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{pmatrix} \quad [10]$$

$$T_e - T_L = \frac{2}{P} J \frac{dw_r}{dt} \quad [11]$$

$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad [12]$$

Estas ecuaciones definen el comportamiento dinámico del motor. Por lo general se estudia el motor de rotor de jaula, por lo que las tensiones d-q del rotor son nulas ( $v_{qr}$  y  $v_{dr}$  de la matriz [10]). De esta forma transformando las tensiones de alimentación del motor al par de ejes d-q, que giran a la velocidad  $w_e$ , se obtienen las corrientes del rotor y del estator, velocidad del rotor y el par electromecánico.

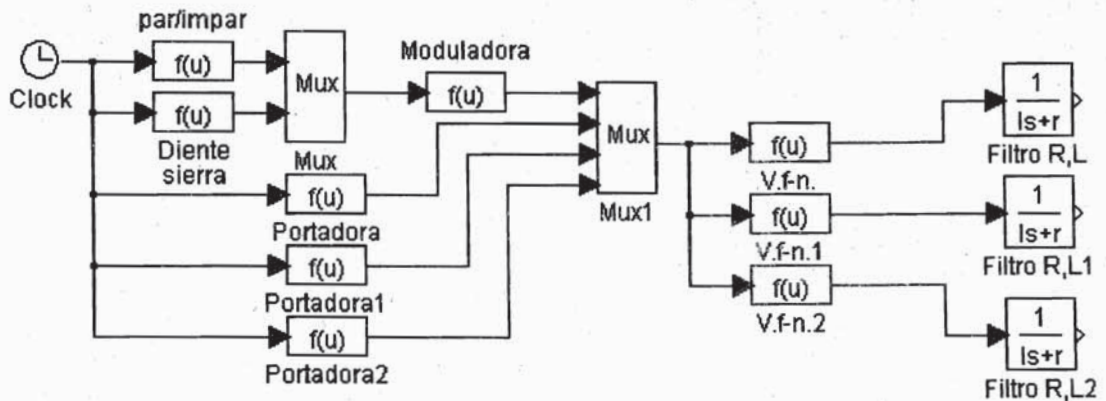


Figura 6. Modelo del PWM trifásico.

El funcionamiento del *PWM* se ha realizado siguiendo la estructura de control real que se aplica a los transistores o GTO [3]. Para la simulación se supone la matriz de transición, sin limitaciones de tensión, frecuencia o corriente. En el modelo se generan tres portadoras (senoidales) y una moduladora (triangular) a las que el usuario puede tener acceso y por tanto modificar sus respectivas amplitudes y frecuencias. En la figura (6) se muestra el modelo diseñado, funcionando con un filtro R-L a la salida con neutro común

Una vez generadas las señales mencionadas, se simulan las tensiones de fase de salida, estas tensiones tendrán un valor de +E (valor de la tensión continua de

alimentación del PWM) o -E, según si la portadora es mayor o menor que la moduladora de cada fase. El control de la velocidad del motor asíncrono se diseñó siguiendo el modelo de regulación en intensidad [6], tal y como se muestra en la figura (7). En las figuras (8) y (9) se detallan la variación del par y la velocidad para un escalón de referencia (de 20 a -20 rad/s) y de las corrientes  $i_{qs}$  e  $i_{ds}$ .

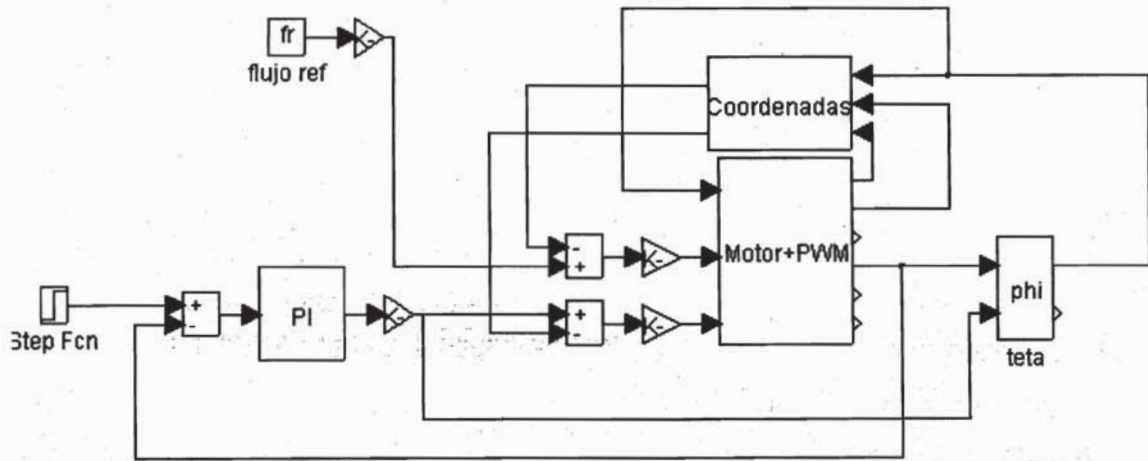


Figura 7. Modelo de control en tensión para el motor ca trifásico.

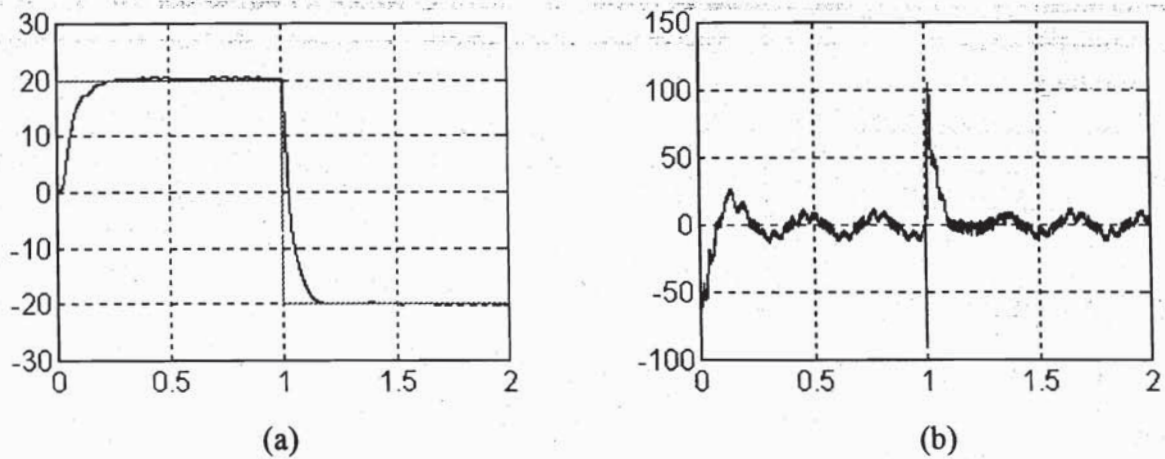


Figura 8. (a) Velocidad del rotor y de referencia (rad/s) - tiempo (s). (b) Tensión de referencia de la fase 1 (V) - tiempo (s)



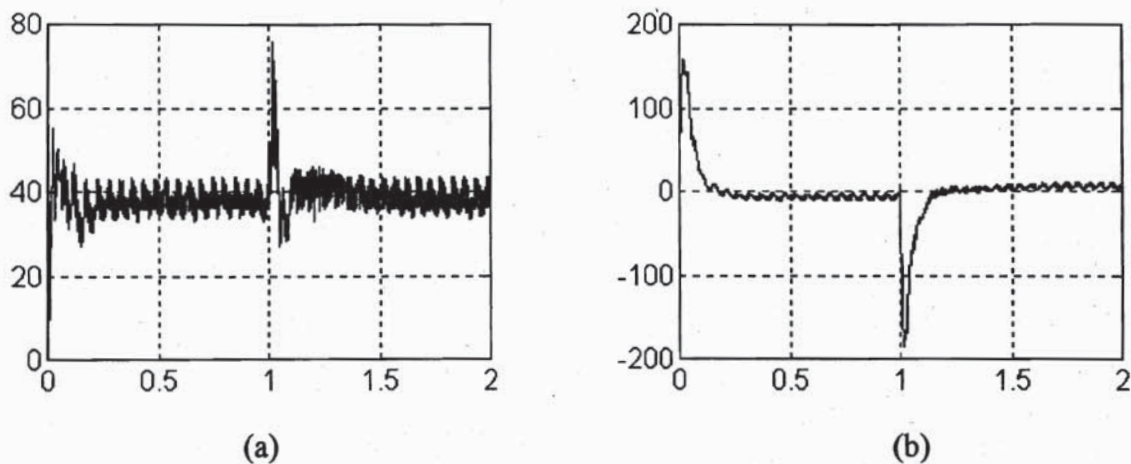


Figura 9. (a) Corriente  $i_{ds}$  (A) - tiempo (s). (b) Corriente  $i_{qs}$  (A) - tiempo(s).

## 5.-CONCLUSION.

Teniendo como plataforma el nuevo entorno gráfico de programación surgido al amparo del sistema operativo *Windows de Microsoft*, basado en la interacción ventanarotón, se consigue ofrecer un entorno abierto de programación que sin duda facilitará la labor del usuario. Desde un principio nuestro objetivo fue, no solo proporcionar al usuario unas herramientas matemáticas de simulación precisas, sino además proveerle de un interface hombre-ordenador atractivo y sencillo tanto en su manejo como a la hora de visualizar las diversas variables a las que se puede acceder en cada momento.

Este camino ha sido poco frecuentado hasta la actualidad, pues por un lado existen programas de simulación de circuitos electrónicos y por otro programas de simulación de sistemas de regulación, donde en el mejor de los casos los convertidores se aproximan por una función de transferencia que en absoluto muestra el comportamiento interno del convertidor como consecuencia de su interacción con el sistema electro-mecánico general al que pertenece. La aplicación de la teoría de Polos de potencia al modelado de estos equipos en entornos de simulación de sistemas dinámicos[5] nos ha proporcionado el equilibrio preciso del que hablábamos al principio; además la utilización de algoritmos numéricos de integración generales nos evita el cálculo de cada una de las soluciones de estos sistemas de ecuaciones particulares de cada convertidor. Podremos ensayar entre diversos métodos comprobando su precisión.

Hemos desarrollado modelos dinámicos de los diversos convertidores así como de las máquinas eléctricas indicadas. Presentamos dos diferentes tipos de aplicaciones, por un lado un entorno de programación gráfico profesional que dota al diseñador o al profesor de plena libertad en el manejo de bloques a la hora de preparar los experimentos, y por otro lado la posibilidad de entregar un interface guiado en el que el usuario sin experiencia o el alumno pueda realizar sus prácticas.

#### 4. BIBLIOGRAFIA.

- [1] Wood P. "Switching Power converters", Van Nostrand Reinhold 1981
- [2] Lorenzo S., Shaker M., Ruiz J.M.y Aldana F. "A new Modeling and Simulation CAD Package for Power Converter Design" *IEEE T. I.E.* Vol 35, nº 5, 1990.
- [3] Mohan N. y otros Power Electronics Addison Wesley, 1992.
- [4] Herranz Acero G. "Electrónica Industrial. Componentes, circuitos y sistemas de potencia.Dpt. Publ. ETSIT. 1983.
- [5] Simulink User's Guide , 1992
- [6] Fumio Harashima y otros. "Multimicroprocessor-Based Control System for Quick Response Induction Motor Drive.*IEEE Transactions on Industry Applications.* Vol. IA-21, nº 4,pp. 602-609,Mayo/junio 1985.
- [7] Amo Párraga, Jose A. y Marín Abarca, Germán. Documento interno Dpto. E. Electrónica: "Teoría de Campo Orientado Aplicada a la Simulación y Control de Motores de C.A. Asíncronos", Enero 1994.