MODELACION DIGITAL DE UNA MAQUINA DE CORRIENTE CONTINUA

ALIMENTADA POR CIRCUITOS A TIRISTORES

Martínez, Nicolás Ing.
MACOSA

Poveda, Mentor MSEE
Profesor Escuela Politécnica Nacional
CONSULTORA INELIN

RESUMEN

Se propone un modelo matemático para la máquina de continua con corrientes como variables de estado para el análisis de su comportamiento en estado estable y en estado transitorio. Por otro lado, se desarrollan modelos matemáticos para representar conversores estáticos que, asociados al modelo de la máquina de continua, permitan analizar el comportamiento del conjunto conversor-máquina y se compara el comportamiento de fuentes experimentales asociadas a una máquina de laboratorio con el objeto de verificar los modelos.

INTRODUCCION

El trabajo desarrollado en la Tesis de Grado[1], previa a la obtención del título de ingeniero en electrónica y control por parte de uno de los autores, que sirven de base para esta presentación, trata de lograr una modelación matemática que implementada en un computador digital permita analizar el comportamiento de estado estable y el transitorio de fuentes controladas de estado sólido que asociadas a máquinas de continua permiten mantener ciertas variables bajo control.

Se ha logrado establecer una comparación aceptable entre resultados experimentales y de los modelos que permiten asegurar la bondad de la modelación lograda.

1. Máquina de Continua

Las ecuaciones matemáticas que rigen el comportamiento de la máquina, tanto en su conexión serie, como en su conexión en derivación, han sido obtenidos del modelo denominado Máquina Primitiva[2], y se indican a continuación:

$$Vd = Id\ Rd + Ld \frac{dId}{dt} \qquad (1)$$

$$Vt = (Rd + Rq)\ Iq + (Ld + Lq) \frac{dIq}{dt} + E \qquad (2)$$

$$Vq = Iq\ Rq + Lq \frac{dIq}{dt} + E \qquad (3)$$

Motor en derivación: {Ecuaciones (1) y (3)}

Vd = voltaje de alimentación al campo
Vq = voltaje de alimentación a la armadura
Id = corriente de campo
Iq = corriente de armadura
Rd = resistencia de campo
Rq = resistencia de armadura
Ld = inductancia de campo
Lq = inductancia de armadura
E = voltaje inducido

Motor serie: {Ecuación (2)}

Vt = voltaje de alimentación
I = Iq = Id = corriente de la máquina

A estas ecuaciones es necesario añadir la ecuación del equilibrio mecánico para obtener el modelo completo:

$$Te = J \frac{dW}{dt} + DW + Tm \qquad (4)$$

$$Te = Gq\ Id\ Iq \qquad (5)$$

Te = par electromagnético
J = momento de inercia del motor
D = coeficiente angular de fricción viscosa
Tm = par mecánico al eje
W = velocidad angular del rotor
Gq = inductancia rotacional

Es necesario anotar que en el motor serie la corriente de campo y la de armadura son iguales; de tal manera que el torque electromagnético vendría expresado por:

$$Te = Gq\ Id^2 = Gq\ Iq^2 = Gq\ I^2 \qquad (6)$$

Debido a que en las máquinas de continua el fenómeno de la saturación tiene mucha importancia, se hace necesaria su consideración en las ecuaciones anteriormente descritas. La inclusión de la saturación se lleva a cabo a través del voltaje inducido tomando como referencia la curva de saturación en vacío y a la velocidad nominal[3]. De tal manera que para una misma corriente de campo la variación del voltaje inducido es lineal con respecto a la velocidad como se indica en la figura 1.1.

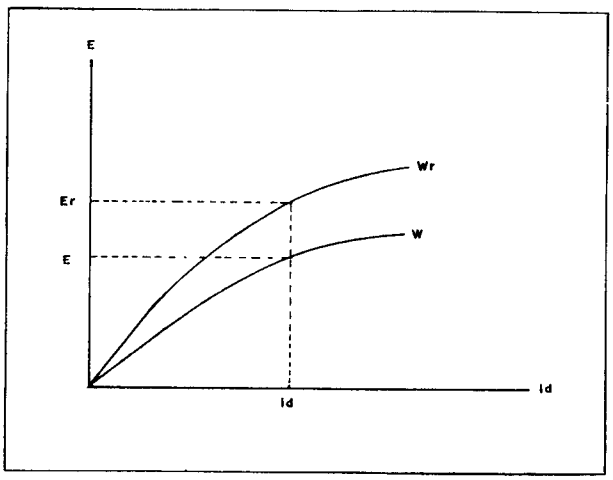


Figura 1.1 Curvas de Saturación en vacío

$$E = Er \frac{W}{Wr} \qquad (7)$$

Ir = voltaje inducido de referencia
Wr = velocidad de referencia (nominal)
W = velocidad del motor
E = voltaje inducido

2. Fuente de Alimentación

La máquina ha sido simulada tomando en cuenta que puede estar alimentada por un circuito rectificador (de 2 pulsos, 3 pulsos ó 6 pulsos), que puede ser controlado o no y que puede tener un diodo de recuperación de energía, o por un circuito troceador.

La modelación de las fuentes de alimentación toma en cuenta los casos de conducción continua y conducción discontinua[4]; y además, el disparo de los tiristores se supone que se lo hace a través de un tren de pulsos. Se asume que los semiconductores son interruptores ideales y que no presentan problemas en su conmutación.

Rectificadores

El funcionamiento de estos circuitos es, prácticamente, el mismo para todos los rectifidadores indicados anteriormente, variando la amplitud de la onda aplicada y el tiempo que permanece un determinado voltaje sobre la carga. En la figura 2.1 se indica la configuración de un circuito rectificador trifásico controlado de media onda (tres pulsos)

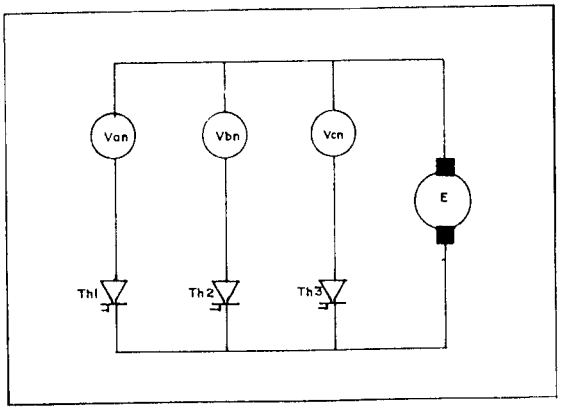


Figura 2.1 Circuito del rectificador trifásico controlado de media onda

y en las figuras 2.2 y 2.3 las formas de onda de voltaje en la carga, y sobre los semiconductores, en los casos de conducción continua y conducción discontinua.

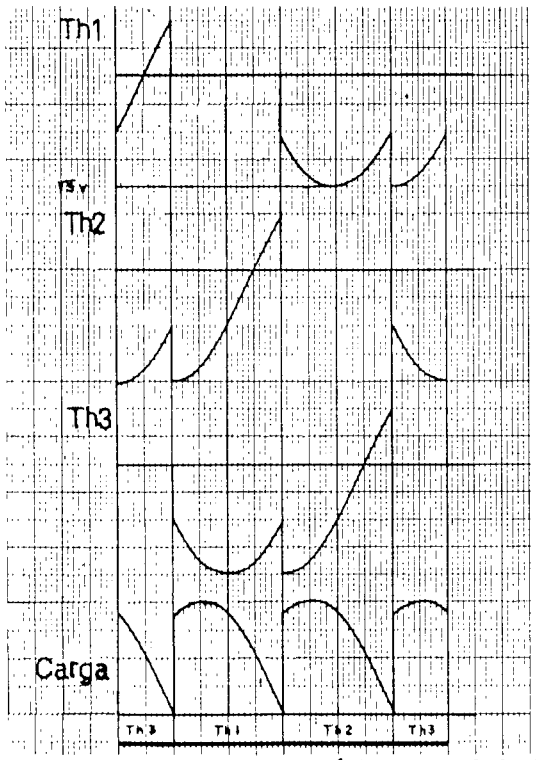


Figura 2.2 Rectificador trifásico controlado de media onda. Conducción continua-Formas de onda

Las formas de onda de los voltajes de alimentación (V), que aparecen solamente en la figura 2.3, son las mismas para la figura 2.2

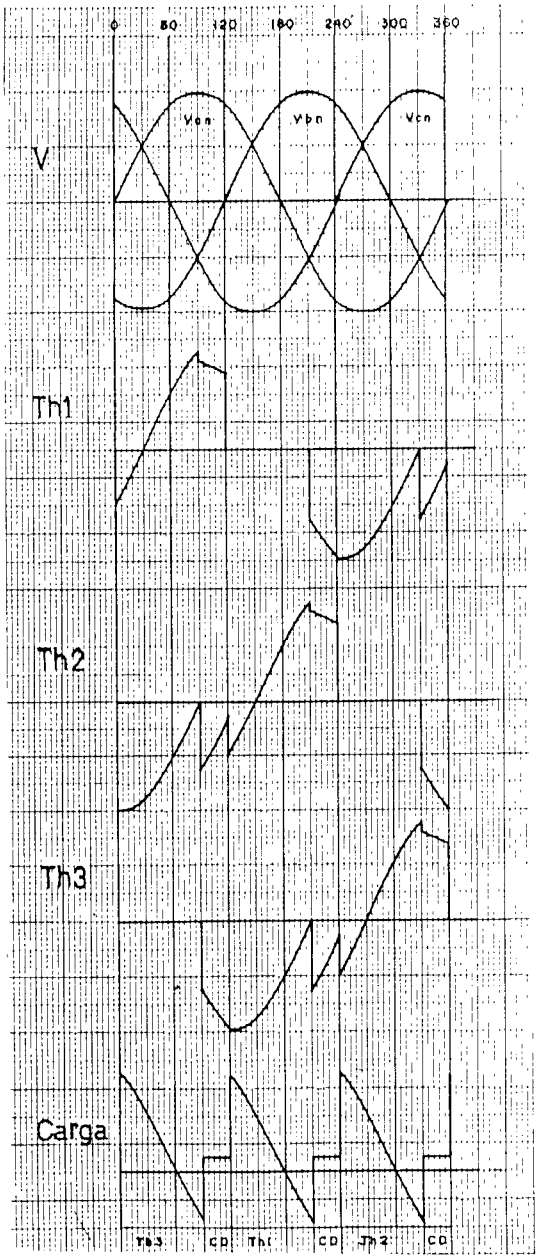


Figura 2.3 Rectificador trifásico controlado de media onda. Conducción discontinua-Formas de onda

Las funciones que determinan estas formas de onda se indican en el Cuadro I, en el cual se puede notar que éstas se van aplicando a la carga siguiendo una determinada secuencia y además, permanecen sobre la máquina un determinado intervalo. Intervalo que corresponde al tiempo de trabajo por período de un semiconductor (en conducción continua). Cada período de red vuelve a repetirse esta secuencia. En el resto de rectificadores simulados las funciones que determinan el voltaje aplicado, al igual que los intervalos de trabajo cambian; pero, de todas maneras mantiene una secuencia que se repite cada período con un cuadro de conducción similar a aquel que se incluye en este trabajo para el rectificador trifásico controlado de media onda y que se lo da a modo de ejemplo de los otros circuitos rectificadores modelados.

CUADRO I

PERIODOS DE CONDUCCION

RECTIFICADOR TRIFASICO CONTROLADO-MEDIA ONDA

Intervalo	Conducción	VakTh1	VakTh2	VakTh3	Vcarga
360n	CC	Vac	Vbc	0	Vcn
360n+30+α	CD	Van-E	Vbn-E	Vcn-E	E
360n+30	CC	0	Vba	Vca	Van
360n+150+α	CD	Van-E	Vbn-E	Vcn-E	E
360n+150+α	CC	Vab	0	Vcb	Vbn
360n+270+α	CD	Van-E	Vbn-E	Vcn-E	E
360n+270+α	CC	Vac	Vbc	0	Vcn
360(n+1)	CD	Van-E	Vbn-E	Vcn-E	E

CC = conducción continua
CD = conducción discontinua
α = Angulo de disparo
n = número de período de la señal Van(0,1,2,...)

Troceador

El circuito simulado se indica en la figura 2.5, del cual se muestran las ondas de voltaje sobre la carga (figura 2.6) que responden a determinadas funciones, dependiendo del semiconductor que esté activado[5]. Así, cuando el tiristor principal (Th1) está en conducción, el voltaje sobre la carga es el de la fuente de alimentación, y cuando lo hace el diodo secundario (Th2), el voltaje en la máquina es cero. En el intervalo de conmutación el voltaje aplicado a la carga vendría expresado por:

$$Vc = 2E - f\ (Iq) \qquad (8)$$

donde:

Vc = voltaje de la carga
E = voltaje de la fuente de alimentación
Id = corriente de armadura de la máquina

Sin embargo, el disparo del tiristor principal y del tiristor secundario se llevan a efecto a intervalos de tiempo iguales en dos períodos distintos.

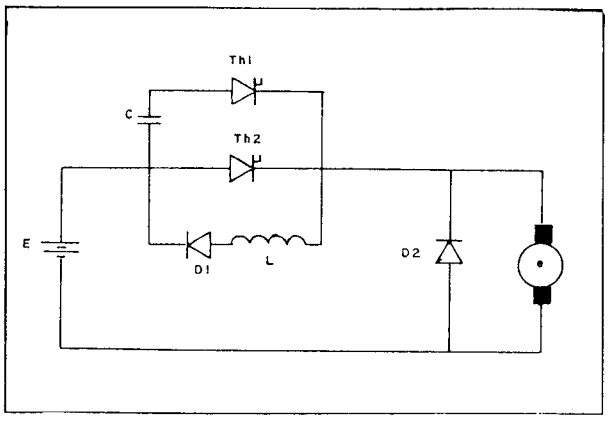


Figura 2.5 Circuito del troceador modelado

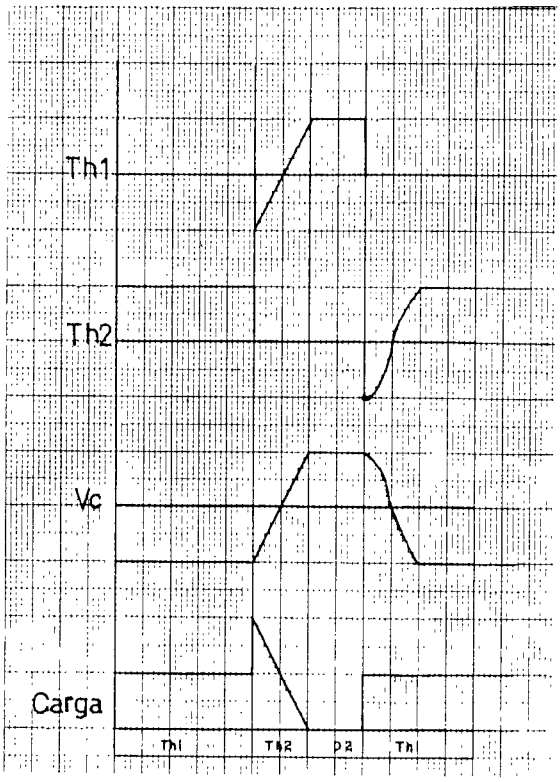


Figura 2.6 Troceador modelado-Formas de onda

3. Programa Digital

Debido a que las ecuaciones que determinan el modelo de la máquina no son lineales y a la forma que poseen los voltajes de alimentación a la misma, se requiere la utilización de procesos iterativos de integración como el Método de Runge-Kutta de Cuarto Orden, para la solución de dichas ecuaciones.

Rectificador

Aprovechando que las ondas de voltaje de alimentación a la máquina provenientes del rectificador son periódicas, se determinan intervalos de integración fijos, tomando en cuenta para ello los tiempos de trabajo de cada semiconductor y la precisión que se desea en la solución de las ecuaciones.

Estos intervalos variarán en el caso de existir una conducción discontinua, lo cual es perfectamente factible con la solución empleada, puesto que el método de Runge-Kutta admite intervalos de integración variables.

Para los rectificadores semicontrolados es necesario definir dos intervalos: uno cuando entra a la conducción un tiristor y otro cuando lo hace un diodo; en cambio, en los rectificadores no controlados o totalmente controlados, sólo se requiere un intervalo.

El tratamiento para los rectificadores que poseen el diodo de recuperación de energía es similar a la de los rectificadores semicontrolados, pues estos poseen el efecto de este diodo inherentemente.

Es necesario tener en cuenta que el momento en que la corriente de la carga se transfiere de un semi-

conductor a otro o cuando la corriente cruza por cero, la función que determina el voltaje sobre la misma se modifica.

En la figura 3.1 se indica un diagrama de flujo general para dar una idea, del algoritmo que se empleó en la modelación de los conjuntos fuente-máquina.

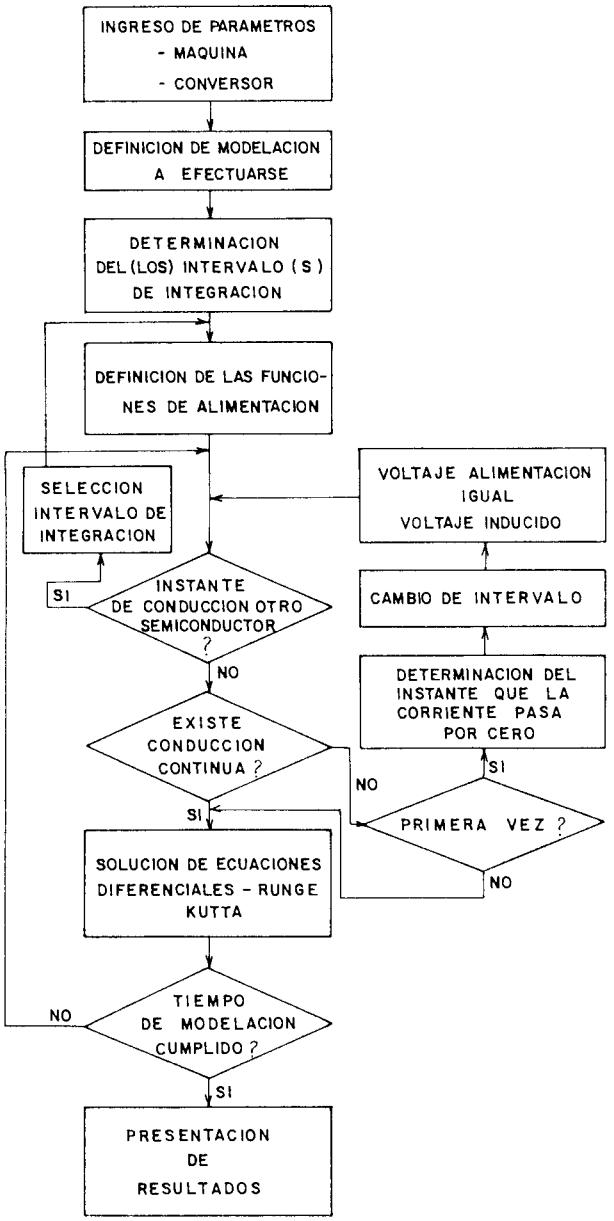


Figura 3.1 Diagrama de flujo general

El momento en que la corriente es negativa, se ejecuta una subrutina que en base a los últimos tres puntos calculados, predice el instante en que la corriente cruzará por cero, posteriormente, la misma subrutina regresa al intervalo de integración previo y hace que el voltaje a los terminales de la máquina sea igual al voltaje inducido como medio para forzar, en el modelo, a que la corriente se haga cero. Esta subrutina se ejecuta una sola vez por período de conducción de cada semiconductor.

El proceso es el mismo para todos los rectificadores, con la diferencia de que cambian las funciones sinusoidales de alimentación y el instante de conducción de cada semiconductor.

Troceador

El proceso que se sigue es en esencia igual al seguido en los rectificadores, con la diferencia de que al activarse el tiristor secundario y producirse la conmutación del tiristor principal, se añade una ecuación más a las del motor, debido a que el voltaje que aparece a los terminales de la máquina es función de la corriente que circula por ella.

Se definen tres pasos de integración, dos de los cuales son siempre constantes (conducción del tiristor principal y conducción del diodo de recuperación) y el restante que es función de la corriente de carga (conducción tiristor auxiliar). Este último intervalo se determina suponiendo que la corriente de carga en el instante de conmutación es constante. En el caso de conducción discontinua, al igual que para los rectificadores, se vuelven a ajustar los pasos de integración.

4. Aplicaciones del programa digital

Con el programa digital desarrollado se puede simular a una máquina de corriente continua, tanto en su conexión serie como en su conexión derivación independiente, en su estado estable o en su régimen transitorio, teniendo como fuente de alimentación circuitos rectificadores de dos, tres o seis pulsos controlados, semicontrolados o no controlados, en los cuales se puede incluir el efecto del diodo de recuperación; además, existe la posibilidad de simular el conjunto troceador-máquina.

La carga aplicada a la máquina puede estar representada por cualquier función matemática que dé como respuesta el torque exigido por la carga a nivel del eje de la máquina.

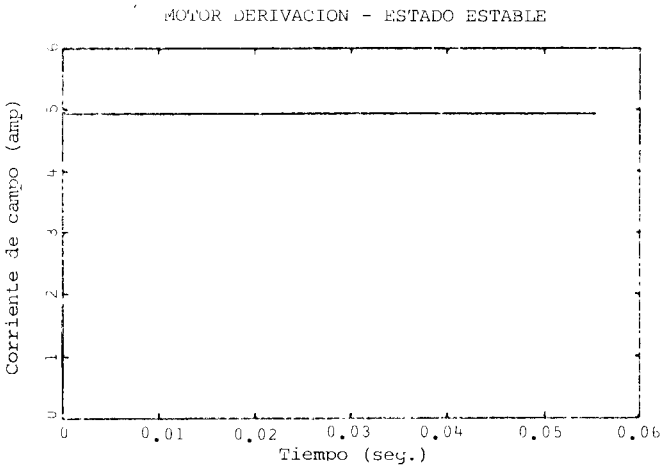
Se realizaron modelaciones de perturbaciones como: inversión del campo, cortocircuito del campo (motor derivación), variación de la resistencia de arranque (motor serie), y variación del torque de carga (ambas máquinas).

Para verificar la validez de los resultados teóricos se realizaron pruebas experimentales en una máquina generalizada Westinghouse de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional, de todas ellas las más representativas son las que se indican a continuación:

4.1 Motor derivación. Estado Estable. Rectificador de 3 pulsos. Angulo de retardo 18°

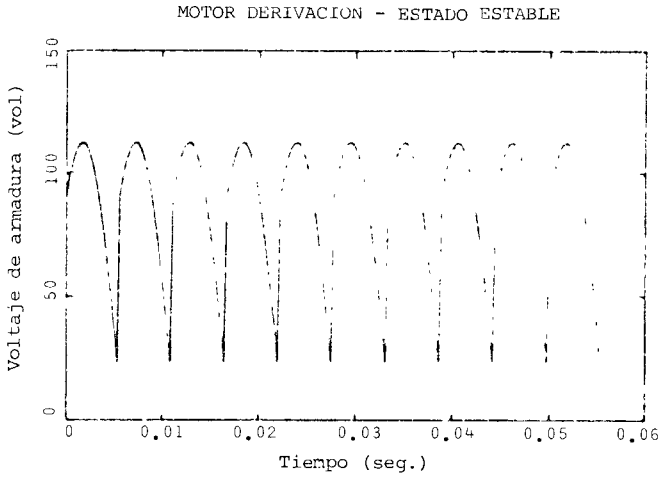
En las figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 se indican los resultados del modelo para la corriente de campo, corriente de armadura, velocidad y voltaje de armadura respectivamente, los que pueden ser comparados con los resultados experimentales de la fotografía de la figura 4.5.

En la fotografía se observa que la corriente de armadura no es la misma en todos los períodos, lo cual posiblemente se debe a problemas en el colector de la máquina, además, se observan variaciones grandes en la corriente de campo, debido en parte a la reacción de armadura y fundamentalmente a que la máquina utilizada no es una máquina netamente de continua; sin embargo, el error existente en la corriente de armadura entre los picos máximos (experimental y teórico) es del -6,67%. En cuanto a la velocidad existe un error de 6,67%.



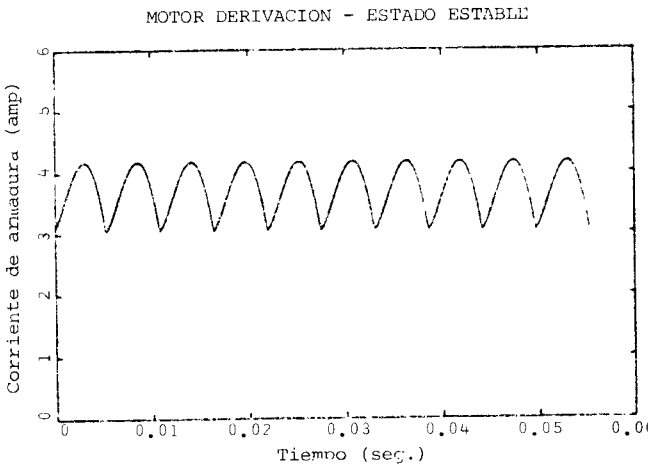
Rectificador de 3 pulsos - Angulo de retardo 18

Figura 4.1



Rectificador de 3 pulsos - Angulo de retardo 18

Figura 4.4



Rectificador de 3 pulsos - Angulo de retardo 18

Figura 4.2

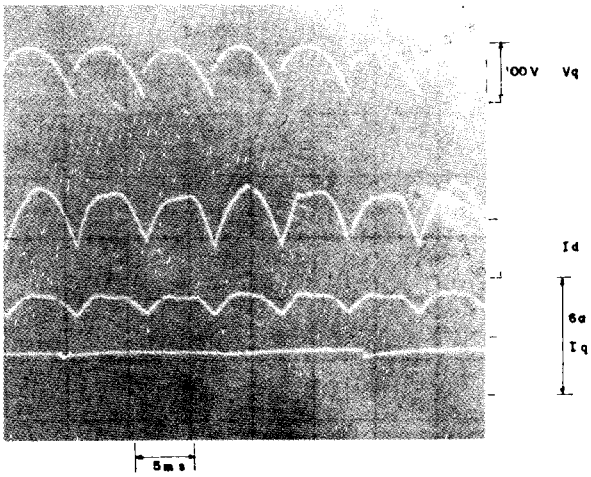
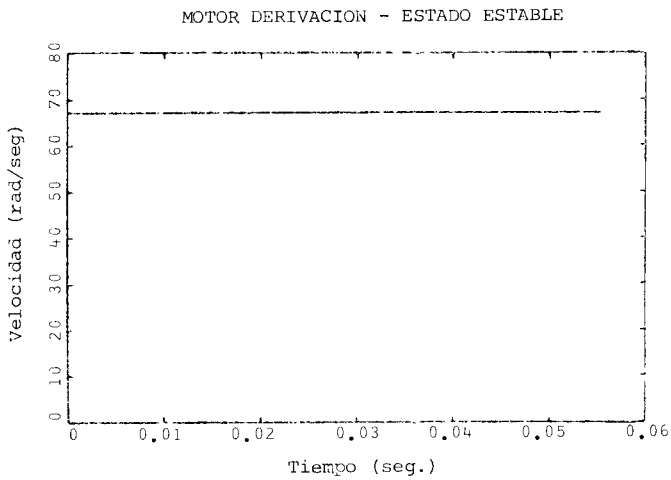


Figura 4.5 Rectificador de tres pulsos. Angulo de retardo 18º Motor en derivación. Resultados experimentales



Rectificador de 3 pulsos - Angulo de retardo 18

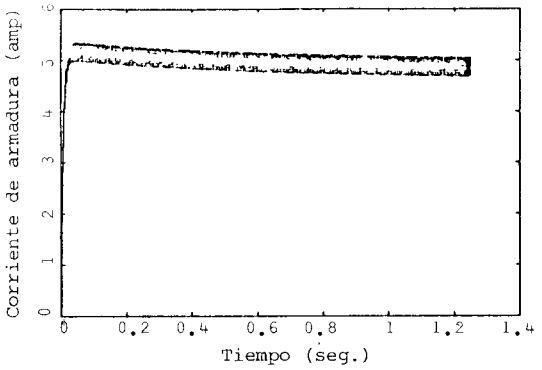
Figura 4.3

4.2 Motor serie. Arranque. Rectificador de 3 pulsos. Angulo de retardo 10°

En las figuras 4.6 y 4.7 se indican los resultados del modelo para la corriente de armadura y velocidad de la máquina. En la fotografía de la figura 4.8 se muestran los resultados experimentales.

De la comparación entre los resultados obtenidos se observa que los valores máximos que alcanza la corriente, son prácticamente los mismos en todo el tiempo simulado. Existe también gran similitud en los valores de velocidad (errores menores del 3%). Sin embargo existe una diferencia de amplitud constante en la onda de corriente, al igual que en el caso anterior.

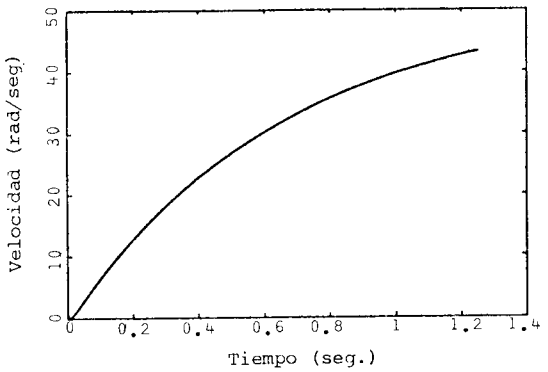
MOTOR SERIE - ARRANQUE



Rectificador de 3 pulsos - Angulo de retardo 10

Figura 4.6

MOTOR SERIE - ARRANQUE



Rectificador de 3 pulsos - Angulo de retardo 10

Figura 4.7

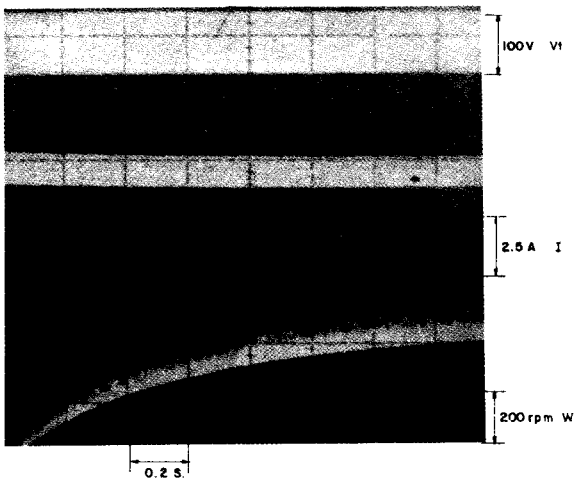


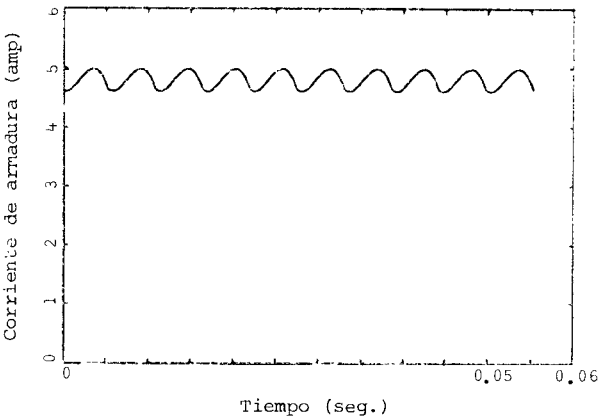
Figura 4.8 Rectificador de tres pulsos. Angulo de retardo 10º Motor serie. REsultados experimentales

4.3 Motor serie. Estado Estable. Rectificador de 3 pulsos

En las figuras 4.9 y 4.10 se indican corriente de armadura y velocidad de la máquina y en la fotografía de la figura 4.11 los mismos resultados, pero experimentales.

La corriente de armadura muestra la misma forma general entre ambos resultados, sin embargo, varía su amplitud. En la velocidad existe un error de aproximadamente el 13%, que puede ser atribuible en parte a la medición de esta variable.

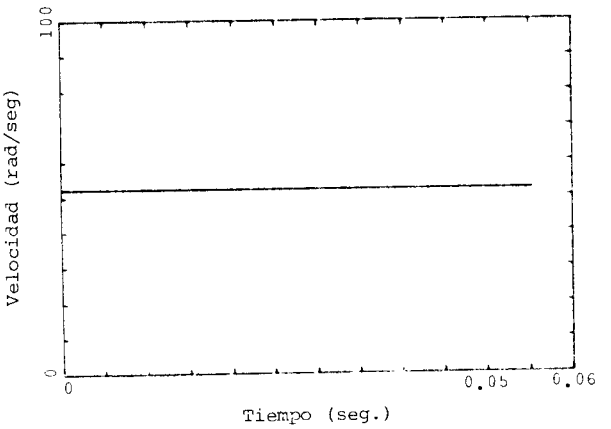
MOTOR SERIE - ESTADO ESTABLE



Rectificador de 3 pulsos - Angulo de retardo 18

Figura 4.9

MOTOR SERIE - ESTADO ESTABLE



Rectificador de 3 pulsos - Angulo de retardo 18

Figura 4.10

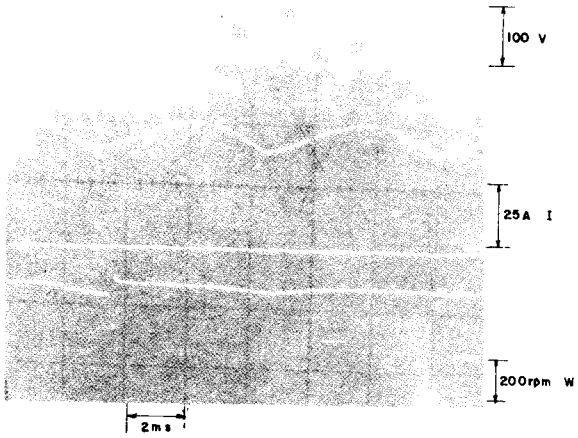


Figura 4.11 Rectificador de tres pulsos. Angulo de retardo 10º Motor serie. Estado Estable. Resultados experimentales.

4.4 Motor serie. Estado estable. Troceador

Los resultados del modelo matemático se indican en las figuras 4.12, 4.13 y 4.14 y los experimentales en la fotografía de la figura 4.15.

Las formas de onda de corriente son muy semejantes, con la diferencia de que, el pico de corriente experimental es mucho mayor que el teórico (debido al paso de integración), con un error del -15%. La amplitud, al igual que en los casos anteriores, también varía. En cuanto a la velocidad existe un error del 7%.

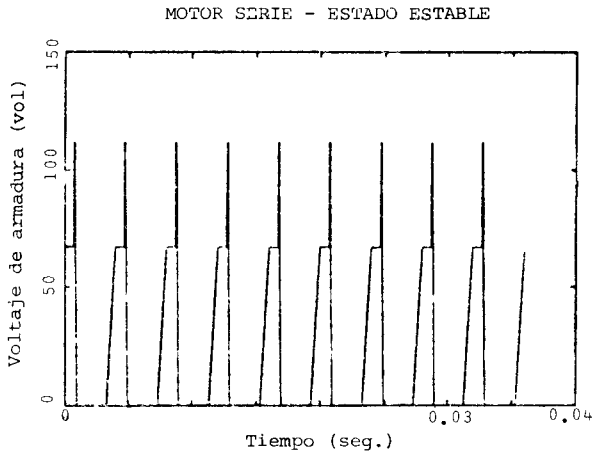


Figura 4.12

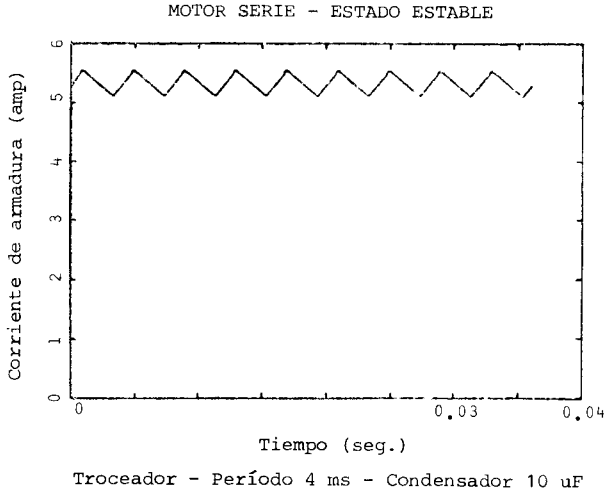


Figura 4.13

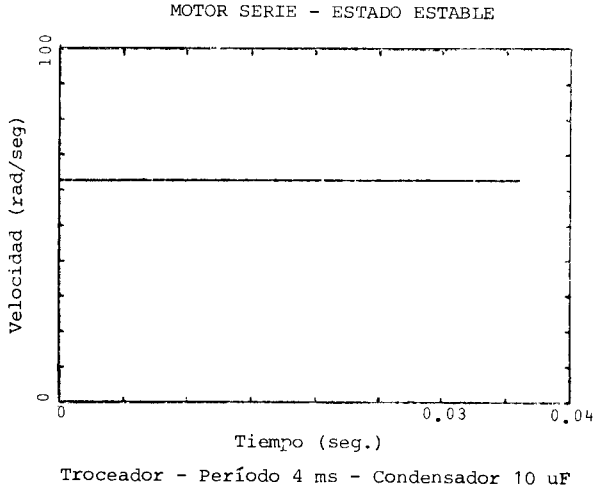


Figura 4.14

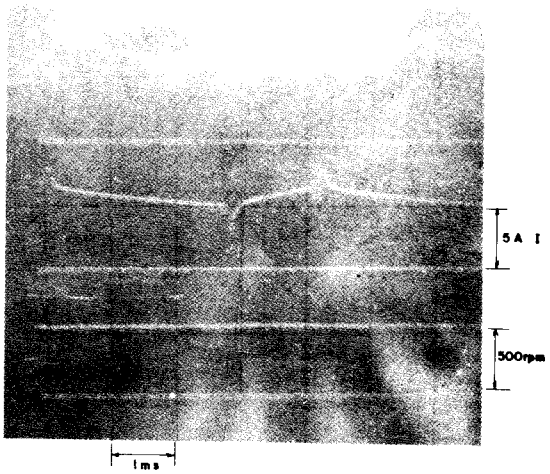


Figura 4.15 Troceador. Motor serie. Estado Estable

5. Conclusiones

La comparación de las respuestas de los modelos desarrollados, con resultados experimentales, permite observar diferencias que están dentro de las mejores espectativas; puesto que, los modelos al despreciar ciertos efectos internos de la máquina o de la fuente, que significan complicar innecesariamente los detalles de la modelación y el esfuerzo de computación, obviamente, deben tener una pequeña diferencia con la realidad. Sin embargo, este trabajo permite modelar un diseño propuesto para control de una máquina y realizar un dimensionamiento de componentes con mucha seguridad (máximo 7% de diferencia con los picos experimentales), sin construir ni siquiera un modelo del diseño propuesto. Además, puesto que, la representación que se presenta admite modelar funcionamiento dinámico o de estado estable, es posible verificar el comportamiento de la máquina o de la fuente en diversas condiciones que exija la carga o la alimentación aún en sus períodos transitorios.

BIBLIOGRAFIA

1. Martínez, Nicolás. "Modelación Digital de una máquina de Corriente Continua Alimentada por Circuitos a Tiristores", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, 1983.

2. Meisel, Jerome. "Principles of Electromechanical-Energy Conversion", Libro, McGraw-Hill Book Co., 1966.

3. Sandoval, Luis. "Comportamiento Dinámico de Máquinas de Corriente Continua Incluida la Saturación Magnética", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, 1981.

4. Astudillo, Jaime. "Estudio Teórico-Experimental de la Velocidad y Torque en un Motor DC Alimentado con Corriente Alterna Rectificada y Controlada en Fase", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, 1981.

5. Montalvo, Luis. "Control Electrónico de Velocidad de un Motor DC para Vehículo Eléctrico", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, 1982.

BIOGRAFIAS

MARTINEZ, NICOLAS. Nació el 12 de julio de 1959. Obtuvo su Título de Ingeniero en Electrónica y Control en 1983 en la Escuela Politécnica Nacional. Actualmente presta sus servicios en la Empresa MACOSA, en Departamento Técnico.

POVEDA, MENTOR. Nació en Quito en junio 26 de 1945. Ingeniero Eléctrico (E.P.N.-1972), Master of Science in Electrical Engineering (Purdue University-1976). De 1969 a 1973 trabajó para INIAP, llegando a desempeñar la Jefatura del Departamento de Planificación. Desde 1972 al presente, Profesor de la Escuela Politécnica Nacional. De 1981 a 1983 colaboró en los diseños del Proyecto Paute-Sistema Nacional de Transmisión como consultor nacional miembro del Consorcio de Consultoras IECO-ASINCA. Actualmente labora en la Consultora de Ingeniería Eléctrica, INELIN, en el Proyecto Estudio Integral del Sistema Eléctrico de Quito. Miembro del IEEE.