



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

128  
Zejou

**Caracterización del Frenado  
Regenerativo Eléctrico para el  
Minibús Eléctrico de Baterías UNAM**

**TESIS PROFESIONAL**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERO MECANICO - ELECTRICISTA**

P R E S E N T A :

**JAVIER MENDOZA MORTERA**

**ASESOR : M. I. PABLO FCO. LARA REYES**

**FALLA DE ORIGEN**



**CD. UNIVERSITARIA**

**1995**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## ***DEDICATORIA***

El valor del esfuerzo realizado a lo largo de los últimos diez años, así como el valor que pueda tener mi colaboración en este trabajo y en el proyecto del minibús UNAM en general, lo dedico con mi más profundo sentimiento a mis padres Aída y Octavio. Gracias por siempre, *ab intra*.

. . . el resto, a mis hermanos:

Octavio  
Armando  
René y  
en especial a Francisco

## ***AGRADECIMIENTOS***

**A mi *alma mater*, la UNAM, que con su Facultad de Ingeniería e Instituto de Ingeniería (en su Coordinación de Automatización) me enseñaron a explotar lo que natura da, y me brindaron generosamente lo que Salamanca sí presta.**

**A todos mis profesores, entre ellos, Amaury Clemente, Jorge Rodríguez, Gerardo Espinosa, Octavio Estrada y Víctor Torres.**

**A mi asesor M.I. Pablo Lara Reyes de quien aprendí 'un buen'. Gracias.**

**A los académicos de la Coordinación de Automatización, Dra Cristina Verde, Dr Gerardo Espinosa, M.I. Rolando Carrera y M.I. Esaú Vicente; también al Dr Ricardo Chicurel. Mi agradecimiento.**

**A los ingenieros Martín Urbina y Luis B. Sosa por su colaboración en el aporte de información para la evaluación del simulador.**

**A mi familia.**

**A mis amigos, Marcos Nolasco, Manuel Gómez, Miguel Moctezuma, Carlos Rivera, Alfonso Prieto, Daniel González, Martín Hernández, Orlando Vivas, Guillermo Ramírez, Rogelio Rivera, Jorge del Valle, Alfredo Vega, Leticia Osawa, Samuel Trejo, Ismael Martínez, Alberto Serrato, Santa Rodríguez, Sergio Márquez, Miguel García, José Mondragón y Eduardo Eslava; a los miembros de la CLA Juan Antonio Mejía , Jorge Armando del Moral y Ricardo Prieto, y en especial a Maricela Estrada por su invaluable apoyo durante la realización de este trabajo.**

*Porque si se generó, no es, ni si está a punto de llegar a ser un día*

*Parménides*

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Generalidades</b>	<b>4</b>
2.1	Descripción general del minibús eléctrico	4
2.2	Implantación del modelo del vehículo eléctrico en una computadora digital	5
<b>3</b>	<b>Modelado e Implantación en Computadora Digital</b>	<b>12</b>
3.1	Descripción de los sistemas del minibús	12
3.2	Sistema mecánico	13
3.3	Tren de transmisión	18
3.4	Sistema de tracción eléctrico	20
3.4.1	Modelo del motor eléctrico	20
3.4.2	Controladores y actuador	26
3.4.3	Modelo del banco de baterías	35
3.5	Generador de ciclos de conducción	40
3.5.1	Ciclos de conducción	40
3.5.2	Programa para la construcción de ciclos de conducción	45
3.5.3	Implantación del generador de ciclos de conducción	54

3.6	Piloto	55
3.7	Integración del simulador	64
3.8	Ejecución de las simulaciones	69
<b>4</b>	<b>Pruebas y Resultados</b>	<b>71</b>
4.1	Evaluación del simulador con datos experimentales de una camioneta eléctrica G-Van	71
4.2	Caracterización del frenado regenerativo eléctrico en el minibús UNAM	91
<b>5</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>107</b>
	<b>Referencias</b>	<b>110</b>
	<b>Apéndice</b>	<b>112</b>

## INTRODUCCIÓN

*"... limited view of transportation ... no  
escape from liquid petroleum fuels"*

*Rita Knorr*

El incremento descontrolado en los niveles de contaminación ambiental, sobre todo en las grandes urbes y regiones industriales, así como el agotamiento de los recursos naturales no renovables, son dos de los problemas considerados en la actualidad como prioritarios y en los que la comunidad científica está trabajando arduamente. En lo que concierne al papel del transporte, es obvio que el rol que desempeñan los vehículos de combustión interna es determinante en ambos problemas.

Una de las posibles acciones que puede atenuar y controlar de manera importante la emisión de contaminantes (inherente al funcionamiento de los vehículos de combustión interna) así como propiciar el empleo de fuentes de energía alternas, consiste en el impulso y desarrollo de un transporte limpio, esto es, un transporte basado en una o más fuentes de energía que al ser transformadas en trabajo útil, contaminen muy poco en comparación con las fuentes de energía convencionales y que además sean renovables. La energía de naturaleza eléctrica presenta las características expuestas, por lo tanto, el desarrollo de los vehículos eléctricos es una alternativa viable.

Con relación al panorama nacional, se encuentra que hay regiones como la Ciudad de México y otras grandes ciudades en condiciones similares, donde urge la solución de los problemas ya mencionados. Como respuesta, el Instituto de Ingeniería de la UNAM, en conjunto con diversas organizaciones tales como el Departamento del Distrito Federal y la Facultad de Química están atacando de manera frontal estos problemas impulsando el desarrollo, diseño y construcción de un minibús eléctrico de baterías para fines de transporte público.

El minibús eléctrico de la UNAM contará con la innovación de disponer de dos medios de tracción y de frenado regenerativo, uno eléctrico y otro hidroneumático, que funcionarán de manera combinada.

El sistema de tracción auxiliar de tipo hidroneumático está formado por una bomba hidráulica, un tanque con nitrógeno a presión y aceite como fluido de trabajo. Este sistema utiliza la presión del nitrógeno para acelerar al vehículo. En una etapa de frenado, el sistema comprime al nitrógeno, regenerándose de esta manera parte de la energía cinética que pierde el vehículo en forma de energía hidroneumática.

Para poder evaluar los beneficios del sistema de tracción auxiliar, es necesario caracterizar primero el comportamiento del frenado regenerativo eléctrico del vehículo. Esto último es el objetivo de este trabajo, y por ello no se tomará en cuenta al sistema hidroneumático durante su desarrollo.

El sistema de propulsión eléctrico permite recuperar la energía cinética que pierde el vehículo en una etapa de frenado. Esto se hace al dotar al vehículo con la capacidad de poder operar al motor eléctrico en modo de generador durante el frenado y disponer de un camino adecuado que permita regresar la energía eléctrica generada al banco de baterías.

La cantidad de energía cinética que puede ser transformada en energía electroquímica en las baterías depende de las eficiencias de los componentes del vehículo (motor, actuador, baterías, etc) así como de sus condiciones de operación tales como, intensidad de frenado, tipo de recorrido y también de la forma en que se combine el frenado regenerativo eléctrico y el frenado disipativo o de balatas.

Este trabajo, consiste en obtener un modelo matemático del vehículo, principalmente del sistema de propulsión eléctrico, implantarlo en una computadora digital y, con base en simulaciones, realizar la caracterización del frenado regenerativo eléctrico en función de la energía regenerada bajo diferentes condiciones de operación. La implantación se realiza en una computadora digital de tipo personal (PC) y las simulaciones se efectúan con la ayuda de un paquete de simulación de sistemas dinámicos no lineales, llamado SIMULINK de MATLAB.

El trabajo de tesis aquí presentado se realizó en forma paralela con el trabajo de tesis de la estudiante Maricela Estrada [1] cuyo objetivo es evaluar la estrategia de combinación de los

sistemas eléctrico e hidráulico. El modelo e implantación en PC del subsistema mecánico del vehículo (inercia, fuerzas resistivas aerodinámicas y de oposición al rodamiento, reducciones de velocidad del tren de transmisión, etc.) se desarrollan enteramente en el trabajo mencionado, mientras que otros subsistemas se realizaron en forma conjunta (piloto, combinación de frenado regenerativo y disipativo, etc).

El capítulo 2 describe en forma general el minibús eléctrico de la UNAM y la operación del paquete de cómputo usado para realizar las simulaciones.

La parte fundamental del trabajo se presenta en el capítulo 3, donde se desarrolla un simulador del vehículo eléctrico con base en la obtención de los modelos particulares que lo conforman hasta llevar al cabo su integración (también se describen brevemente los modelos que componen el modelo mecánico del minibús realizados en la ref 1).

En el capítulo 4, se presentan primero pruebas del simulador con datos experimentales, producto de pruebas de campo efectuadas en una camioneta eléctrica de baterías. Con base en estas pruebas se comprueba que el simulador tiene un desempeño aceptable. Enseguida, y con base en simulaciones del comportamiento del vehículo, se analiza el desempeño del frenado regenerativo eléctrico en términos de la cantidad de energía que recupera bajo diferentes intensidades de frenado, así como en términos del consumo de energía en un ciclo de conducción con tres etapas básicas, aceleración, marcha a velocidad constante y frenado, bajo diferentes intensidades de frenado y con la restricción de que la distancia recorrida por el vehículo en cada caso es la misma. Por último, se encuentra el ahorro de energía asociado al empleo del frenado regenerativo para una prueba con un gran número de ciclos de conducción, donde estos ciclos de conducción corresponden a un patrón establecido por la SAE (*Society of Automotive Engineers*) que describe de manera aproximada el tipo de operación que se desea para el minibús UNAM.

Finalmente, en el capítulo 5 se comentan, a manera de conclusiones, los resultados encontrados durante la realización de este trabajo.

## **GENERALIDADES**

### ***2.1 Descripción general del minibús eléctrico***

El minibús eléctrico de la UNAM será un pequeño autobús de pasajeros, con capacidad para treinta personas (incluyendo a personas que viajarán de pie y al conductor). Tendrá un peso aproximado de 6500 kg, una velocidad máxima de 60 km/h, una velocidad crucero de 40 km/h y una aceleración inicial máxima de  $0.9 \text{ m/s}^2$  [2].

Se planea utilizar este minibús como transporte en los circuitos de Ciudad Universitaria de la UNAM.

El sistema de tracción eléctrico está formado por los siguientes elementos:

- a) Motor de inducción con rotor tipo jaula de ardilla
- b) Inversor (actuador del motor)
- c) Banco de baterías de plomo ácido

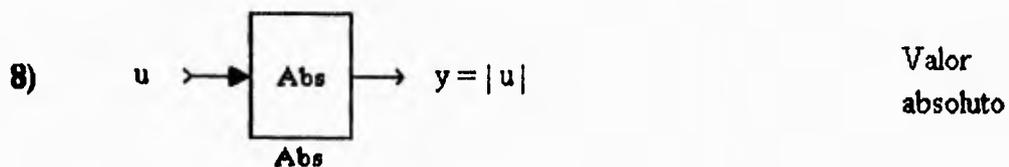
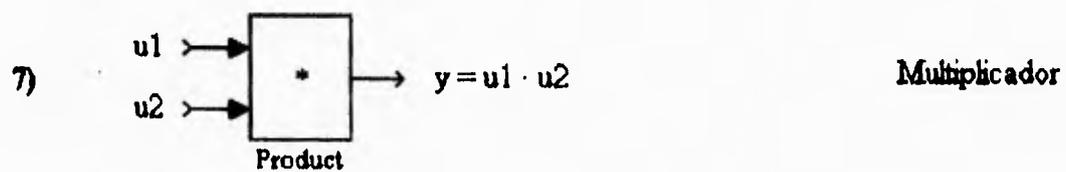
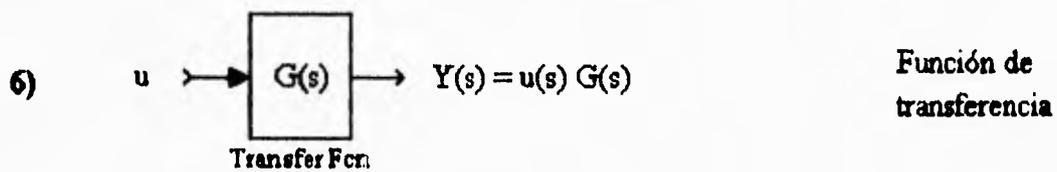
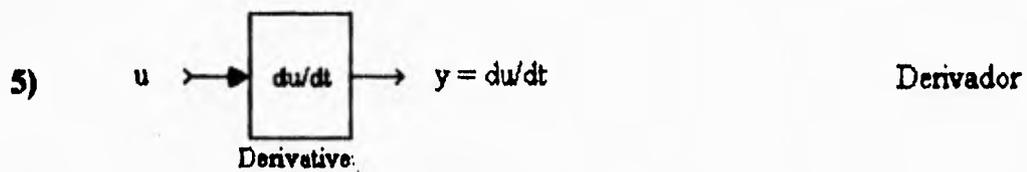
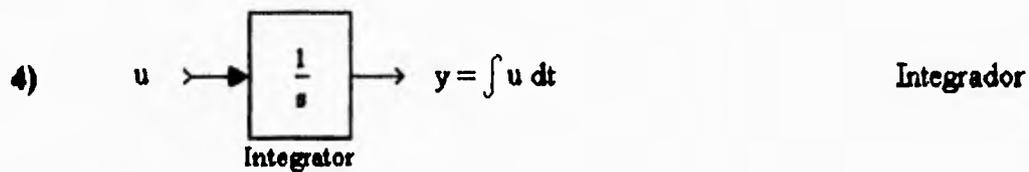
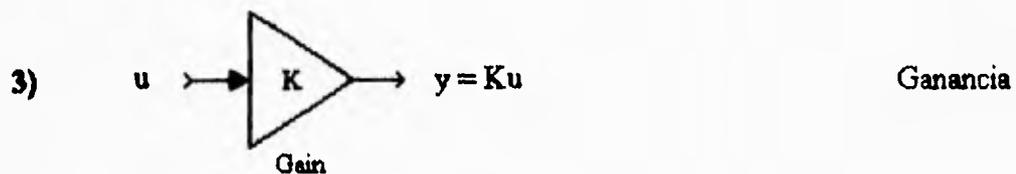
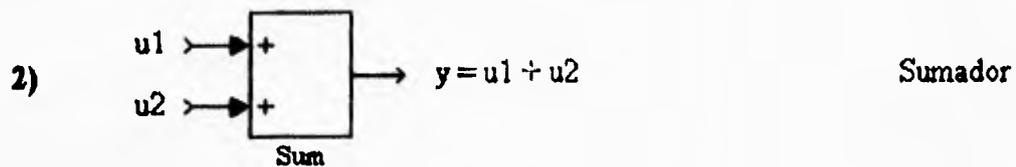
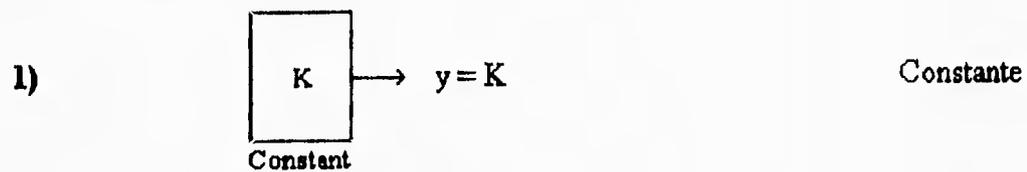
El motor eléctrico de inducción es de la compañía Rexroth Indramat [3] del tipo usado en los husillos de las máquinas-herramientas, modelo 2AD132D de 30 kW nominales. El actuador del motor es un módulo inversor de la misma compañía (Rexroth Indramat), modelo KDA3.2-150 adaptado para trabajar a partir de una sola alimentación de 300 VCD. Este inversor está dotado de la técnica de orientación de campo, y con ella se realiza un control del par del motor; el par de comando al inversor se envía a través de una señal analógica de 0 a 10 volts.

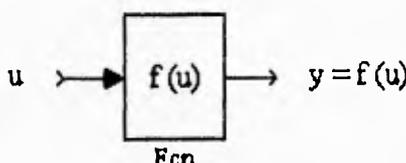
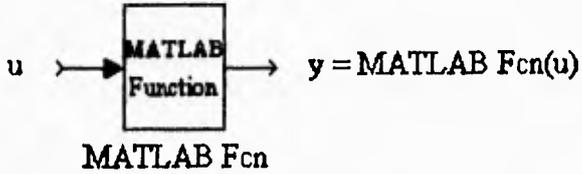
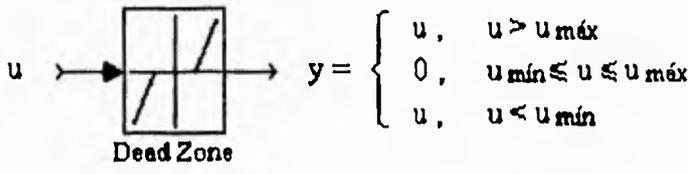
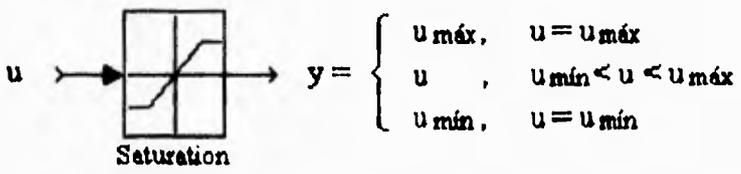
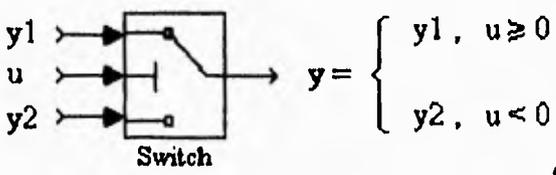
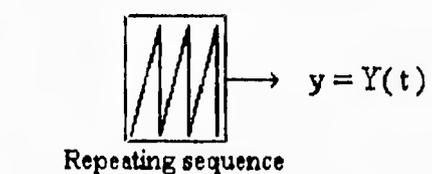
El banco de baterías está formado por 48 baterías de plomo ácido, modelo 12-EVB-1180 de GNB Industrial Battery Company; cada batería es de 12 volts nominales en circuito abierto, de 100 Ah de capacidad a 3 horas de descarga y de 30 kg de peso. El banco total de baterías se forma con la conexión en paralelo de dos bancos formados cada uno por 24 baterías conectadas en serie. Así pues, el voltaje nominal del banco es de 288 volts con una capacidad total de 200 Ah.

## ***2.2 Implantación del modelo del vehículo eléctrico en una computadora digital***

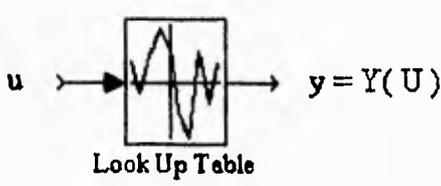
Para facilitar el modelado e implantación en computadora del vehículo eléctrico, se subdividió a dicho vehículo en subsistemas. La implantación en computadora de dichos subsistemas se lleva a cabo con ayuda del paquete de asistencia matemática MATLAB y en particular con el uso de su utilería SIMULINK. Esta utilería permite simular sistemas dinámicos no lineales y trabaja con base en bloques operacionales que pueden ejecutar diversas funciones. La integración de un sistema se hace con la interconexión de estos bloques operacionales.

A continuación, se muestran y describen los bloques operacionales que se utilizan en este trabajo y con los cuales se forman los diagramas de bloques de cada uno de los sistemas constitutivos del simulador del vehículo, en dichas descripciones se han respetado los títulos originales en inglés de los bloques y se añade sus nombres en español.

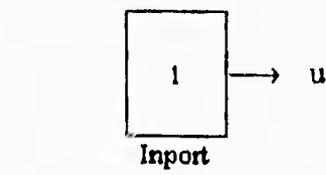


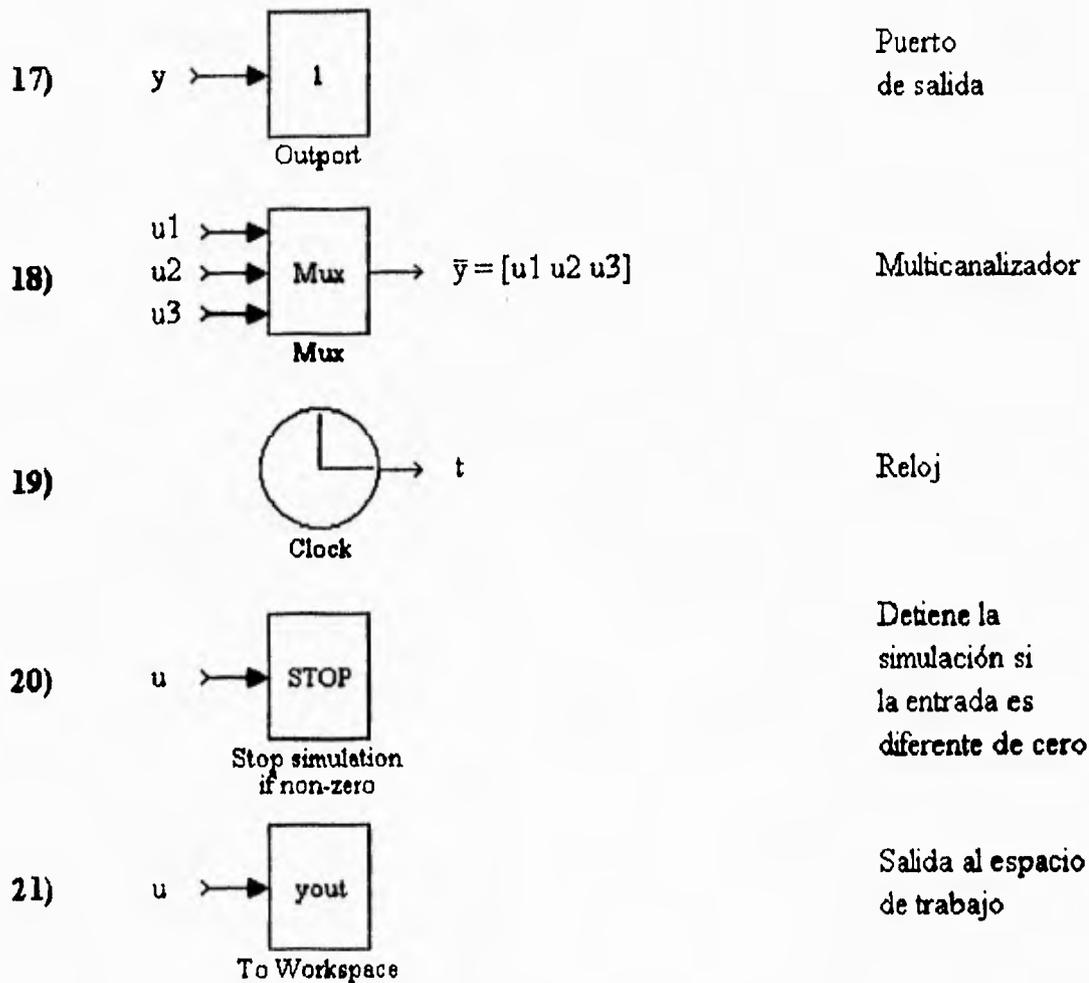
- 9)  Función
- 10)  Función de MATLAB
- 11)  
$$y = \begin{cases} u, & u > u_{\text{máx}} \\ 0, & u_{\text{mín}} \leq u \leq u_{\text{máx}} \\ u, & u < u_{\text{mín}} \end{cases}$$
 Zona muerta
- 12)  
$$y = \begin{cases} u_{\text{máx}}, & u = u_{\text{máx}} \\ u, & u_{\text{mín}} < u < u_{\text{máx}} \\ u_{\text{mín}}, & u = u_{\text{mín}} \end{cases}$$
 Saturación
- 13)  
$$y = \begin{cases} y1, & u \geq 0 \\ y2, & u < 0 \end{cases}$$
 Conmutador
- 14)  
$$y = Y(t)$$

t	Y
t1	y1
t2	y2
⋮	⋮
tn	yn

Secuencia repetitiva
- 15)  
$$y = Y(U)$$

U	Y
u1	y1
u2	y2
⋮	⋮
un	yn

Consulta de tabla
- 16)  Puerto de entrada



La manera en que funciona cada uno de los bloques se detalla en el manual de SIMULINK [4], de cualquier manera, enseguida se hace una descripción breve de algunos de los bloques especiales y se da información sobre los métodos de integración que utiliza el paquete.

En el bloque *Fcn*, la entrada  $u$  es evaluada bajo una función determinada. La operaciones que se pueden realizar dentro de este bloque además de las algebraicas incluyen funciones trascendentales, operadores relacionales y operadores lógicos. Con éstos últimos se tiene también la posibilidad de condicionar la salida a una relación lógica en función de la entrada.

En el bloque *MATLAB Fcn*, la entrada  $u$  es evaluada bajo cualquier función del paquete MATLAB, la cual puede ser una elevación a una potencia, una función signo, una función coseno, etc. Este bloque (a diferencia del *Fcn*) puede evaluar cualquier función de MATLAB sin restringirse únicamente a funciones trascendentales.

El bloque *Mux* multicanaliza sus variables de entrada para producir un vector de salida que puede, por ejemplo, alimentar una función de MATLAB que requiera más de una entrada.

Los bloques *Inport* y *Outport* se utilizan cuando se agrupa un sistema en un solo bloque para que este acepte entradas de o envíe salidas al exterior.

El bloque *Clock* presenta como salida el tiempo de la simulación. Puede emplearse también como una base de tiempo.

En el bloque *STOP* la variable de entrada sirve para detener la simulación, lo que ocurre si dicha entrada es diferente de cero.

El bloque *To Workspace* envía su entrada al espacio de trabajo de MATLAB en forma de un vector cuyo nombre debe especificarse al activar el bloque; el nombre del vector aparece en el marco del bloque.

Los sistemas formados con estos bloques pueden agruparse para formar un nuevo bloque. Cada nuevo bloque puede identificarse con algún símbolo apropiado, a este proceso se llama enmascaramiento. Por ejemplo, el sistema llamado A, de la Fig 2.1 puede enmascarse bajo el bloque de la Fig 2.2. El dibujo dentro del bloque enmascarado (que en la Fig 2.2 es un triángulo) es creado por el usuario.

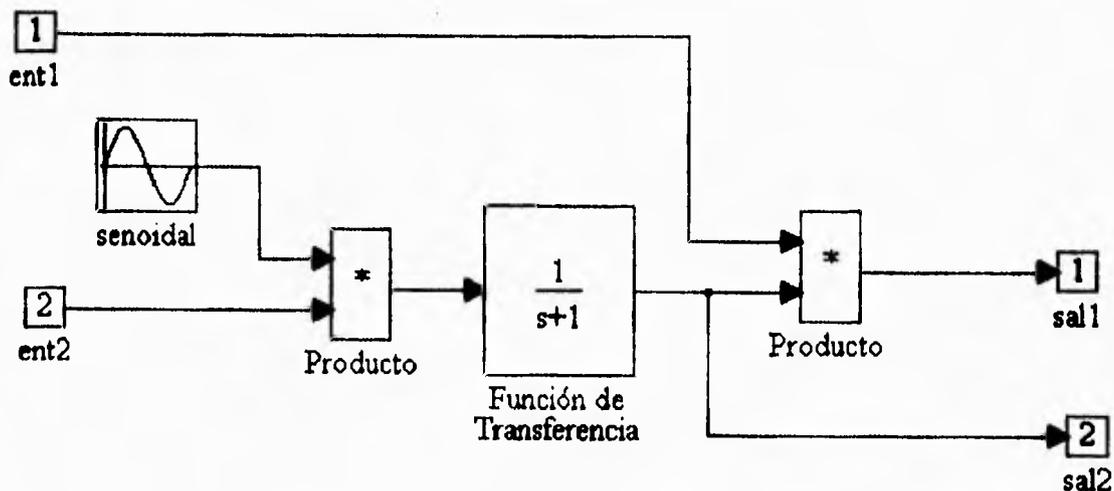
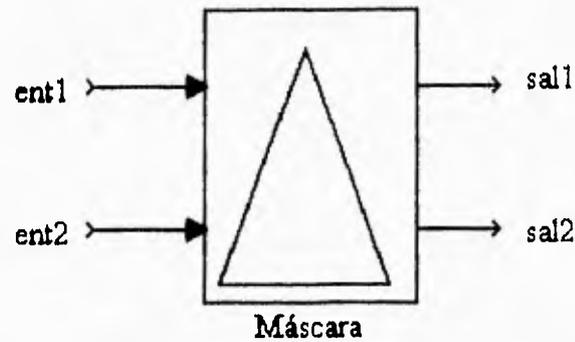


Fig 2.1 Sistema A



**Fig 2.2** Máscara del sistema A

Para la simulación de un sistema, SIMULINK cuenta con un número determinado de métodos de integración para la resolución numérica de los modelos matemáticos. Para la elección del método más adecuado es necesario disponer de información básica sobre el sistema a analizar. La información más importante consiste en conocer de alguna manera que tan no lineal es el sistema que se modela; dando una medida de esto el número de bloques no lineales que intervienen en el modelo. A continuación, se presentan los métodos de integración con que cuenta SIMULINK y las recomendaciones de selección más importantes que presenta el manual de usuario del paquete [4]:

- *Linsim*

Si el sistema es esencialmente lineal y contiene pocos bloques no lineales, el método funciona bien. *Linsim* es particularmente bueno comparado con otros métodos cuando los bloques lineales que intervienen en el modelo tienen tanto dinámicas lentas como rápidas.

- *Runge-Kutta 3 y Runge-Kutta 5*

Los métodos *Runge-Kutta* son usualmente los más empleados en comparación con los otros métodos, principalmente cuando los sistemas son altamente no lineales y/o discontinuos. También funcionan bien con sistemas híbridos, es decir, aquellos que mezclan sistemas continuos y discretos. Estos métodos no funcionan bien cuando el sistema tiene dinámicas lentas y rápidas.

- *Gear*

Se emplea cuando el sistema es suave y no lineal. El método no funciona bien cuando existen singularidades en el sistema o si el sistema está sujeto a perturbaciones debidas a cambios rápidos de las entradas.

- *Adams*

Se emplea para sistemas que son suaves y no lineales cuyas constantes de tiempo no tienen un rango muy amplio de variación.

- *Euler*

El método de *Euler* multiplica las derivadas por el paso de integración para actualizar el estado de las variables. Requiere pasos de integración mucho más pequeños que los otros métodos para conseguir precisiones semejantes, por lo que no se recomienda su uso en la mayoría de los problemas. De acuerdo con el manual del paquete, debe emplearse únicamente para verificar resultados

Atendiendo a las recomendaciones anteriores, y debido a que el modelo del vehículo involucra dinámicas lentas y rápidas, pero sobre todo mediante pruebas de simulación realizadas con los diferentes métodos, el método que se eligió fue el de *Linsim*, y los valores de los pasos de integración que se emplearon son, para el máximo (*Max Step Size*) un valor de 1, y para el mínimo (*Min Step Size*) un valor de 0.1 segundos. El valor de la tolerancia (*Tolerance*) fue de  $1 \times 10^{-3}$  segundos. Estos valores se asignan en la opción *Parameters* del menú *Simulation* de la barra de menús de SIMULINK.

Existen dos maneras de realizar la asignación de valores a los parámetros de los modelos implantados en SIMULINK, la primera consiste en asignarlos directamente en los bloques, y la segunda consiste en poner el nombre de las variables en los bloques del modelo y hacer la asignación de valores a dichos nombres a través de un archivo de datos que se coloca o guarda, en el subdirectorio donde se instale el paquete MATLAB. En las implantaciones de los modelos del vehículo realizadas en este trabajo se ha usado el segundo método, de tal manera que el primer paso para la realización de una simulación será el de asignar, por medio de un archivo, todos los valores de los parámetros asociados al modelo.

En lo que resta de este trabajo, todas las implantaciones de los modelos en computadora digital se presentan con los esquemas utilizados en SIMULINK.

## **MODELADO E IMPLANTACIÓN EN COMPUTADORA DIGITAL**

### ***3.1 Descripción de los sistemas del minibús***

**Para el modelado e implantación en computadora se subdividió al vehículo en subsistemas. En algunos de estos, el modelado e implantación se realizó en el trabajo paralelo de la ref 1, en otros, dichas tareas se realizaron en forma conjunta.**

**A continuación se presentan los diferentes subsistemas en los que se subdividió al vehículo y se indica si su modelado e implantación fue realizado en este trabajo, en el trabajo paralelo, o de manera conjunta.**

- **Sistema mecánico del minibús.-** Sistema que involucra la inercia del vehículo y todas las fuerzas que intervienen en él (de tracción, frenado y fricción), este sistema fue desarrollado en la ref 1.
- **Tren de transmisión.-** Sistema que involucra la reducción mecánica asociada al diferencial así como la transformación de las variables rotacionales a traslacionales que se realiza en las ruedas (este sistema fue desarrollado en la ref 1).
- **Sistema de tracción eléctrico.-** Sistema encargado de la propulsión del vehículo y compuesto por el motor eléctrico, su actuador y el banco de baterías (realizado por completo en este trabajo).

- **Generador de ciclos de conducción.**- Sistema encargado de determinar el ciclo de conducción que se impone al vehículo durante una simulación. Un ciclo de conducción es la referencia de velocidad que deberá seguir el vehículo y el perfil de pendiente al que se somete el mismo (sistema desarrollado de manera conjunta con el de la ref 1).
- **Piloto.**- Sistema encargado de comandar a los sistemas de tracción (que en este trabajo será únicamente el eléctrico) y al frenado disipativo, de manera tal que el vehículo pueda seguir el ciclo de conducción establecido. Este sistema incluye una estrategia de frenado que combina al frenado regenerativo eléctrico con el disipativo o de balatas (sistema desarrollado de manera conjunta con el de la ref 1).

Enseguida se presentan los modelos e implantación en SIMULINK de los subsistemas del vehículo, después se muestra la integración del simulador y finalmente se describe la forma de ejecutar una simulación.

### **3.2 Sistema mecánico**

El modelo del sistema mecánico, generalmente usado en el análisis dinámico de vehículos [5], considera al minibús como un cuerpo rígido que se desplaza en línea recta con una pendiente variable, al que se le aplica una fuerza producida por los sistemas de propulsión (que puede ser tanto tractiva como de frenado) y por el frenado disipativo o de balatas. Dicho modelo toma en cuenta la fuerza resistente al rodamiento, la fuerza de arrastre o aerodinámica y en él se desprecia tanto el efecto del viento como el de las pérdidas en la suspensión. A continuación se describen las fuerzas que intervienen en el modelo del sistema mecánico.

La fuerza de reacción de la inercia del minibús,  $F_m(t)$ , de acuerdo con la segunda ley de Newton, es:

$$F_m(t) = m dv(t) / dt \quad (3.1)$$

donde:

$m$  - masa del vehículo, kg

$g$  - aceleración de la gravedad,  $m/s^2$

$v(t)$  - velocidad del vehículo,  $m/s$

Las componentes del peso del vehículo se calculan de la siguiente manera:

$$W_n(\theta) = mg \cos(\theta) \quad (3.2)$$

$$W_p(\theta) = mg \sin(\theta) \quad (3.3)$$

donde:

$W_n(\theta)$  = componente del peso del vehículo normal al piso, N

$W_p(\theta)$  = componente del peso del vehículo paralela al piso, N

$\theta$  = pendiente, rad

El valor de la pendiente  $\theta$ , que se considera aquí como una constante, se actualizará durante la simulación en función del desplazamiento calculado del vehículo de acuerdo con un perfil conocido como ciclo de conducción. La fuerza resistente al rodamiento ( $F_r(\theta)$ ), se expresa como:

$$F_r(\theta) = r_0 W_n(\theta) \text{signo}(v(t)) \quad (3.4)$$

donde  $r_0$  es un coeficiente que se determina experimentalmente.

La función signo aplicada a la velocidad se utiliza en la ec 3.4 para garantizar que la fuerza resistente al rodamiento esté siempre en dirección contraria a la de la velocidad (con la función signo se obtiene un 1 si la velocidad es positiva, un -1 si es negativa y un cero si es cero).

La ecuación que define a la fuerza de arrastre ( $F_d(t)$ ) cuya magnitud depende del cuadrado de la velocidad y cuyo sentido debe ser siempre opuesto al de la velocidad se expresa como en [6]:

$$F_d(t) = \frac{A C_d \rho}{2} |v(t)| v(t) \quad (3.5)$$

donde:

$A$  = área frontal del vehículo,  $m^2$

$\rho$  = densidad del aire,  $kg/m^3$

$C_d$  = coeficiente aerodinámico adimensional que depende de la forma del objeto y se obtiene experimentalmente

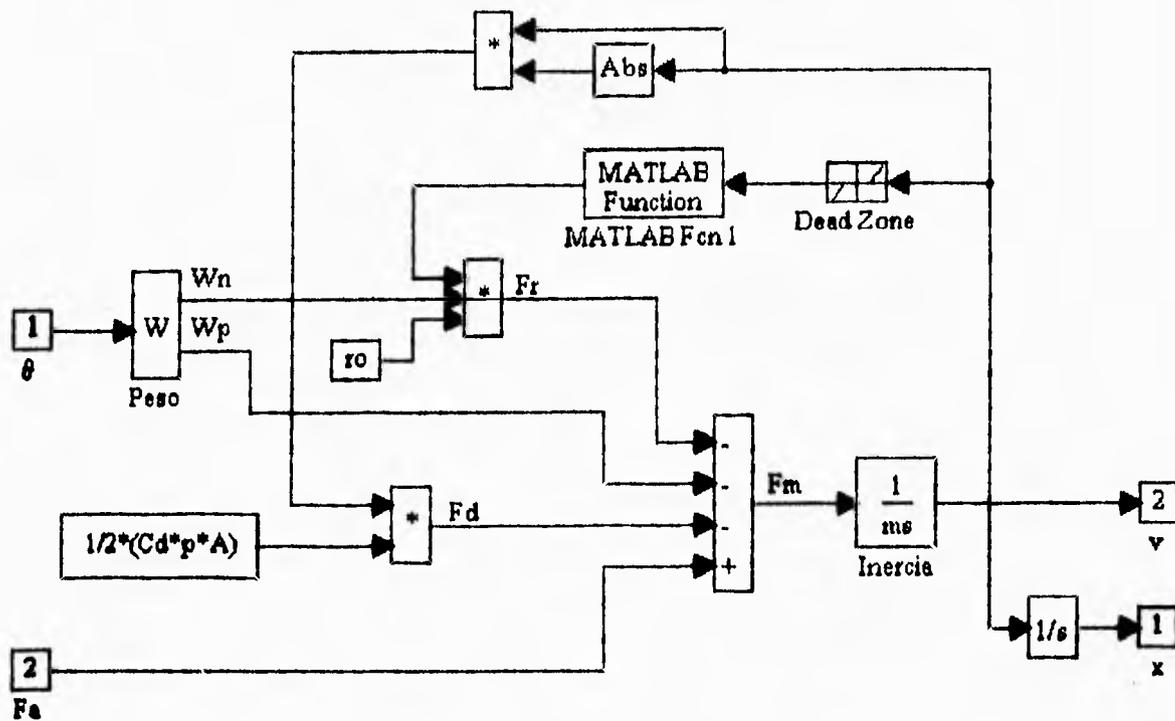
Para la obtención del modelo sólo es necesario hacer la suma de fuerzas en la dirección del movimiento del vehículo:

$$F_a(t) - F_r(\theta) - F_d(t) - F_m(t) - W_p(\theta) = 0 \quad (3.6)$$

donde:

$F_a(t)$  = fuerza aplicada por los sistemas de propulsión y el sistema de frenado disipativo o de balatas, N

La implantación del modelo (representado por las ecs 3.1 a 3.6) en el paquete SIMULINK se ilustra en la Fig 3.1.

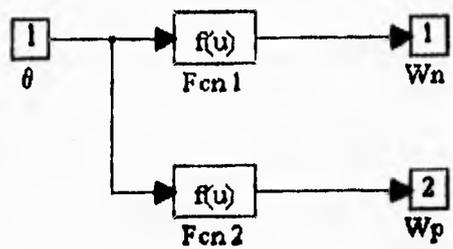


**Fig 3.1** Implantación en SIMULINK del modelo del sistema mecánico

La función signo de la ec 3.4 se aplica con el bloque *MATLAB Fcn 1* (utilizando la función *sign(u)* de MATLAB). Por otro lado, para evitar oscilaciones del signo de la fuerza resistiva  $F_r$  en la vecindad de la velocidad nula durante la resolución numérica del modelo, se introdujo un bloque *dead zone* (de zona muerta) con el que se fuerza a que, para el cálculo del sentido de las fuerzas resistivas, la velocidad se considere cero en un intervalo de velocidad muy pequeño alrededor de la velocidad nula.

Se calcula adicionalmente en el esquema de la Fig 3.1 el desplazamiento del vehículo ( $x(t)$ ).

En el bloque denominado *Peso*, se calculan las componentes del peso, normal y paralela al piso, a partir del valor de la pendiente. Desenmascarando este bloque *Peso*, se observa el diagrama (Fig 3.2) que realiza los cálculos del peso. *Fcn 1* evalúa la ec 3.2 y *Fcn 2* la ec 3.3 .



**Fig 3.2** Diagrama en SIMULINK del cálculo del peso del minibús

La máscara con la que se identifica al sistema mecánico de la Fig 3.1 es la que se muestra enseguida (Fig 3.3).



**Fig 3.3** Máscara del modelo del sistema mecánico

De acuerdo con los datos de la ref 2, los valores de los parámetros del sistema mecánico del minibús son:

- $r_o = 0.014$
- $A = 6 \text{ m}^2$
- $C_d = 0.6$
- $\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$
- $m = 6500 \text{ kg}$
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

### 3.3 Tren de transmisión

El tren de transmisión del minibus tiene como propósito comunicar la potencia de los sistemas de propulsión a las ruedas, adecuando la velocidad lineal del vehículo a las velocidades angulares de los sistemas de tracción. Está formado por la flecha cardán, el diferencial y las ruedas.

Las ecuaciones constitutivas del tren de transmisión son:

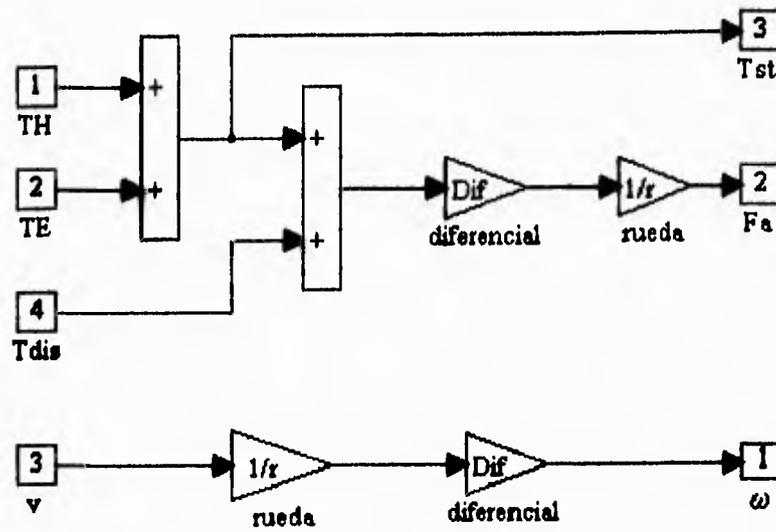
$$T_{st}(t) = T_H(t) + T_E(t) \quad (3.7)$$

$$F_a(t) = \frac{[T_{st}(t) + T_{dis}(t)]}{r} \text{Dif} \quad (3.8)$$

$$\omega(t) = \frac{\text{Dif}}{r} v(t) \quad (3.9)$$

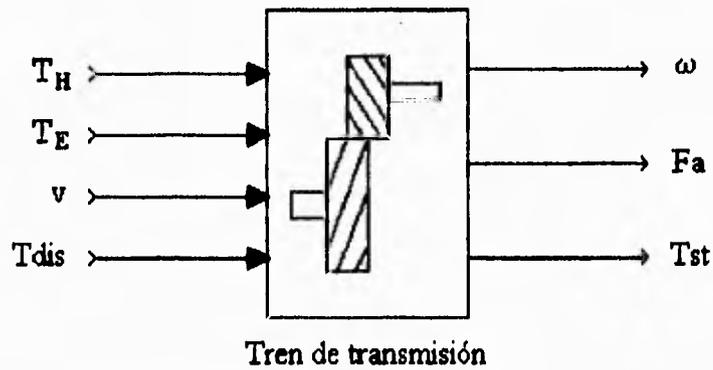
En donde  $r$  es el radio de las ruedas (en metros); Dif es la razón de reducción de velocidad del diferencial con respecto a 1.  $T_H(t)$  y  $T_E(t)$  son los pares que aplican a la flecha cardán, los sistemas hidráulico y eléctrico, respectivamente.  $T_{st}(t)$  es el par de propulsión total en la flecha cardán. Aunque el par de frenado disipativo ( $T_{dis}(t)$ ) se aplica directamente en las ruedas, para poder compararlo con los otros pares que se aplican al vehículo, se convino en considerarlo como un par que se aplica en la flecha cardán.  $F_a(t)$  es la fuerza aplicada al minibus. La velocidad angular de la flecha cardán es  $\omega(t)$ .

La Fig 3.4 representa la implantación en SIMULINK del tren de transmisión.



**Fig 3.4** Diagrama del tren de transmisión

El icono correspondiente al tren de transmisión se ilustra en la Fig 3.5.



**Fig 3.5** Máscara del tren de transmisión

En el caso concreto del minibús eléctrico del Instituto de Ingeniería, el radio de las llantas ( $r$ ) es de 0.405 m y el diferencial tiene una razón de reducción de 5.13 : 1, esto es  $Dif = 5.13$ .

### 3.4 Sistema de tracción eléctrico

Como se ha mencionado, el sistema de tracción eléctrico se forma por los siguientes elementos: una máquina eléctrica, su actuador (y los controladores en el implantados), y un banco de baterías. A continuación, se presenta el modelado e implantación de dichos modelos en computadora.

#### 3.4.1 Modelo del motor eléctrico

El inversor utiliza la técnica llamada de campo orientado [3], la que hace que el comportamiento del motor de inducción sea equivalente al de un motor de CD con excitación independiente [7]. Aprovechando esta característica, se propone utilizar el modelo de un motor de CD equivalente para simular el comportamiento del motor de inducción.

En la fig 3.6 se muestra el diagrama electromecánico de un motor de CD con excitación independiente, conectado a la flecha cardán del vehículo mediante un reductor de velocidad mecánico.

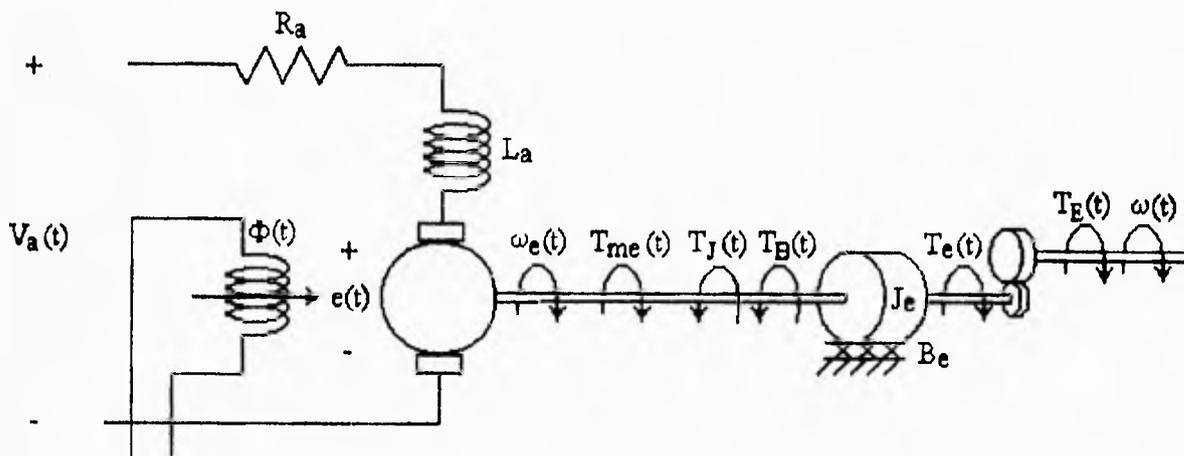


Fig 3.6 Diagrama electromecánico del motor de CD

donde:

$V_a(t)$  -Voltaje de armadura, V

$i_a(t)$  -Corriente de armadura, A

$e(t)$  -Fuerza contraelectromotriz inducida, V

$\Phi(t)$  -Flujo de campo, Wb

$T_{me}(t)$  -Par mecánico de origen eléctrico, N m

$T_e(t)$  -Par de carga del vehículo, referido a la flecha del motor, N m

$T_E(t)$  -Par de carga del vehículo, referido a la flecha cardán, N m

$\omega(t)$  -Velocidad angular de la flecha cardán, rad/s

$R_a$  -Resistencia de la armadura,  $\Omega$

$L_a$  -Inductancia de la armadura, H

$J_e$  -Inercia del motor, N m s<sup>2</sup>

$B_e$  -Coeficiente de fricción viscosa del rotor, N m s

Las ecuaciones constitutivas del motor ideal son:

$$e(t) = K_e \Phi(t) \omega_e(t) \quad (3.10)$$

$$T_{me}(t) = K_e \Phi(t) i_a(t) \quad (3.11)$$

Donde  $K_e$ , es una constante relacionada con las características de construcción del motor.

Las ecuaciones constitutivas del reductor son simplemente:

$$T_E(t) = R_e T_e(t) \quad (3.12)$$

$$\omega_e(t) = R_e \omega(t) \quad (3.13)$$

Donde  $R_e$  es la razón de reducción del reductor de velocidad mecánico asociado al motor eléctrico.

Al resolver el circuito de armadura, en función de la variable compleja  $s$ , se obtiene la ecuación que modela la dinámica eléctrica del motor:

$$(L_a s + R_a) I_a(s) = V_a(s) - E(s) \quad (3.14)$$

Por otra parte, la dinámica mecánica del motor está dada por la siguiente ecuación:

$$T_e(s) = T_{me}(s) - (J_e s + B_e) \Omega_e(s) \quad (3.15)$$

Con las ecuaciones 3.10 a 3.15, se obtiene el esquema que modela el comportamiento general del motor de CD.

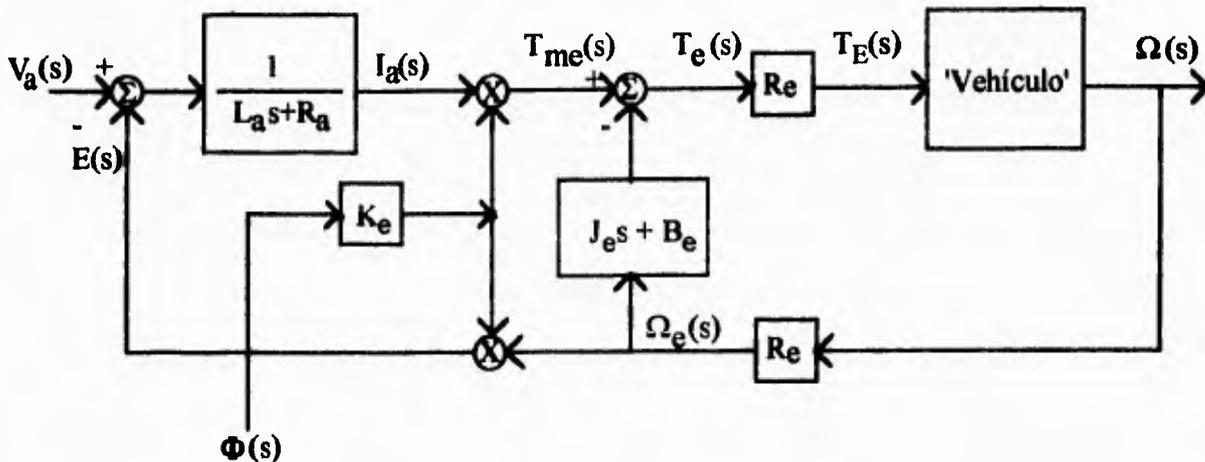


Fig 3.7 Modelo del motor de CD con excitación independiente

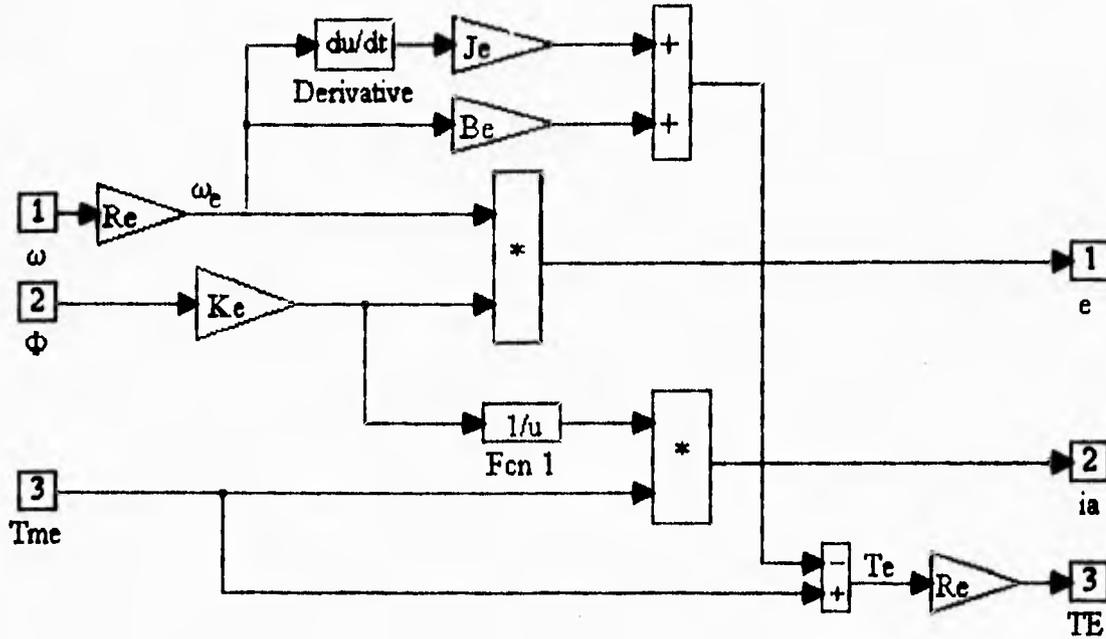
Donde el bloque llamado 'Vehículo' representa al comportamiento del vehículo, que al suministrarle un par  $T_E(t)$  producirá una velocidad  $\omega_e(t)$  en el motor.

Ahora bien, en los motores eléctricos la dinámica eléctrica es normalmente mucho más pequeña que la dinámica mecánica. Un valor de constante de tiempo, típica de un motor de CD de una potencia semejante a la del motor de inducción utilizado, es de aproximadamente 15 ms [8], mientras que la dinámica mecánica del vehículo es del orden de las decenas de segundos. La introducción de un lazo de control de corriente en el motor hace aun más rápida la dinámica eléctrica lo que permitirá despreciar la dinámica eléctrica del sistema.

Al despreciarse la dinámica eléctrica, se simplifica el modelo del motor ya que ahora la parte eléctrica del mismo se rige únicamente por la siguiente ecuación:

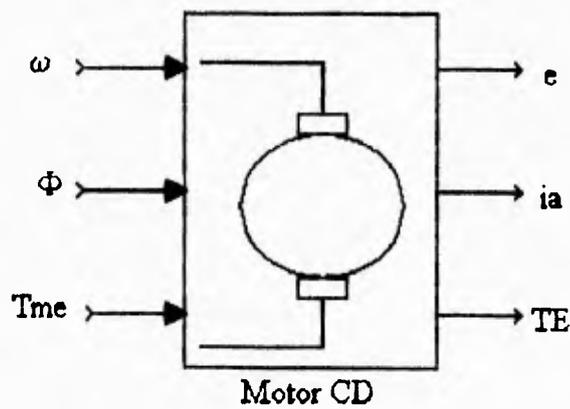
$$i_a(t) = \frac{V_a(t) - e(t)}{R_a} \quad (3.16)$$

La manera en que se encuentra implantado el modelo del motor de CD en SIMULINK es como se muestra en la Fig 3.8.



**Fig 3.8** Implantación en SIMULINK del modelo del motor de CD

La máscara para el esquema de la figura anterior se presenta en la siguiente figura:



**Fig 3.9** Máscara del bloque *Motor CD*

### Cálculo de los parámetros del motor de CD equivalente

El conjunto inversor-motor de inducción, con control de campo orientado seleccionado, presenta las siguientes características [3]:

Potencia mecánica continua máxima o nominal ( $P_N$ ):	30 kW (40.21 HP)
Potencia intermitente máxima :	45 kW (60.32 HP)
Par nominal ( $T_{eN}$ ):	133.25 N m
Velocidad nominal ( $\omega_N$ ):	225.14 rad/s (2150 rpm)
Tensión nominal del motor:	220 V rms
Par intermitente:	222 N m
Velocidad máxima ( $\omega_{m\acute{a}x}$ ):	785.4 rad/s (7500 rpm)
Eficiencia nominal del motor( $\eta_N$ ):	92 %
Peso del motor:	135 kg
Inercia del rotor ( $J_e$ )	0.055 N m s <sup>2</sup>
Tensión nominal de entrada al inversor ( $V_{aN}$ ):	300 V (CD)
Corriente máxima del inversor	150 A (CD)

Al no disponer de información para calcular el valor del coeficiente de fricción viscosa del motor, y al ser la medición de este parámetro complicada y dado que el efecto de la fricción viscosa es muy pequeño comparado con el efecto de la resistencia al rodamiento y la fuerza de arrastre aerodinámica del vehículo, se supondrá, como una primera aproximación, que el coeficiente de fricción viscosa es cero ( $B_e=0$ ) y que las pérdidas por efecto Joule en la resistencia de armadura son las causantes de todas las pérdidas en el motor.

El cálculo de la corriente nominal de armadura se hace con base en la expresión que define la eficiencia nominal del motor,  $\eta_N$ .

$$\eta_N = \frac{P_N}{V_{aN} I_{aN}} \quad (3.17)$$

Donde  $I_{aN}$  es la corriente nominal de entrada al inversor. Si se despeja  $I_{aN}$  y se asignan valores, el valor de  $I_{aN}$  es igual a 108.7 A.

Así, para el cálculo de la resistencia de armadura y a partir de las condiciones nominales, se tiene que:

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_{\text{entrada}}} = \frac{P_N}{P_N + i_{aN}^2 R_a} \quad (3.18)$$

Al despejar  $R_a$  de 3.18:

$$R_a = \frac{1}{i_{aN}^2} \left[ \frac{P_N}{\eta_N} - P_N \right] \quad (3.19)$$

Al sustituir los datos correspondientes en la ec 3.19, se obtiene el valor de la resistencia de armadura:

$$R_a = 0.22 \Omega$$

Para simplificar la obtención de la constante de construcción  $K_e$ , se consideró un valor nominal de flujo magnético de magnitud unitaria ( $\Phi_N = 1$ ) y se despreciaron las pérdidas asociadas a la generación del campo. De esta manera, dicha constante se calcula a partir de las ecuaciones 3.10 ó 3.11, considerando los valores nominales de las variables de motor, como sigue:

$$K_e = \frac{e_N}{\omega_N} \quad (3.20)$$

donde:

$$e_N = V_{aN} - i_{aN} R_a \quad (3.21)$$

o bien

$$K_e = \frac{T_{eN}}{I_{aN}} \quad (3.22)$$

Al sustituir valores:

$$K_e = 1.226$$

La inercia del rotor es, según los datos del fabricante [3], igual a  $J_e = 0.055 \text{ N m s}^2$ .

### 3.4.2 Controladores y actuador

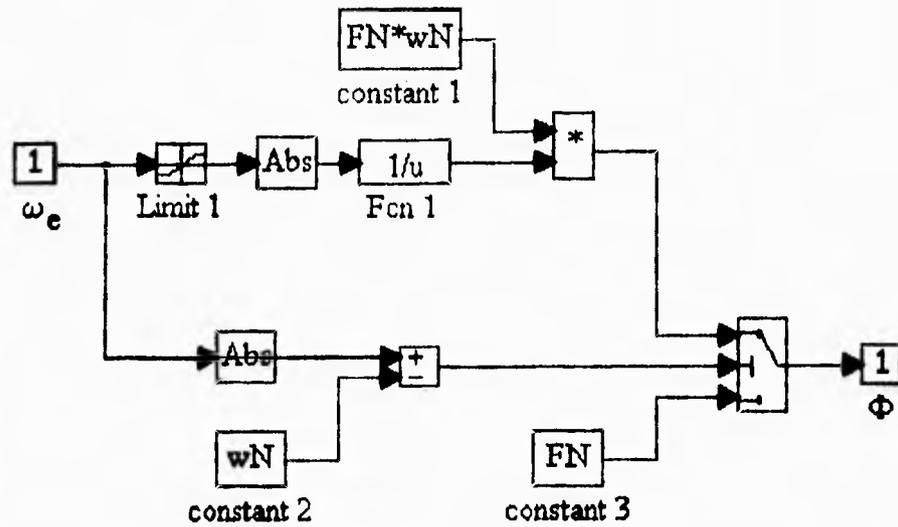
#### Control de flujo

Para regular la velocidad de un motor de CD en una aplicación de tracción, se utilizan normalmente dos métodos [9]. En el primero, la velocidad del motor puede ser variada desde su estado de reposo hasta su velocidad nominal. Para hacer esto, se recurre a la variación del voltaje de armadura desde cero hasta su valor nominal manteniendo el flujo magnético constante, y se dice que el motor funciona en su región de par constante. El segundo método se utiliza cuando se desea que el motor opere a velocidades mayores que la nominal. Este consiste en variar el campo para debilitar el flujo magnético y así aumentar su velocidad y se dice que el motor funciona en su región de potencia constante o de debilitamiento de campo. La velocidad nominal es el valor de transición entre una y otra región.

Normalmente, en la región de par constante se opera al motor con flujo nominal. Para velocidades mayores que la nominal, se compensa el aumento de velocidad con la disminución del par haciendo que este disminuya de manera inversamente proporcional a la velocidad angular del motor logrando además con esto restringir la potencia máxima que entrega el motor. Lo anterior se consigue haciendo que valor del flujo magnético se comporte de la siguiente manera:

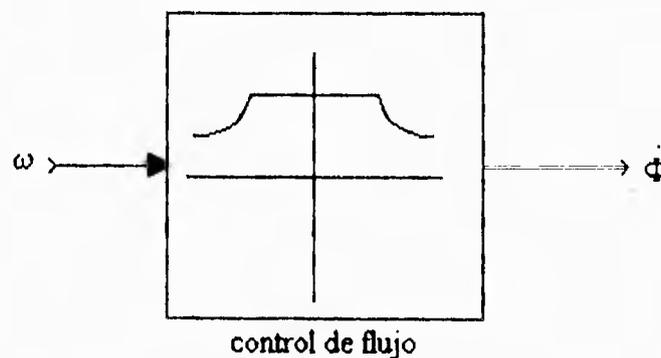
$$\Phi(t) = \begin{cases} \Phi_N & \omega_e(t) \leq \omega_N \\ \Phi_N \left( \frac{\omega_N}{|\omega_e(t)|} \right) & \omega_e(t) > \omega_N \end{cases} \quad (3.23)$$

La realización en SIMULINK del control de flujo, se presenta en la Fig 3.10.



**Fig 3.10** Control de flujo

La función del bloque *Limit 1* es la de evitar problemas de cálculo al evaluar  $1/\omega_e(t)$  cuando  $\omega_e(t)=0$ . Para ello, se impone a  $\omega_e(t)$  un límite inferior con un valor arbitrario menor que  $\omega_N$  y mayor que cero, y se deshabilita el límite superior asignándole un valor muy grande. Debido a que el paquete MATLAB no permite usar letras griegas como variables, en los bloques *constant 1*, *constant 2* y *constant 3*, se denota al flujo nominal y velocidad angular  $\Phi_N$  y  $\omega_N$  por FN y wN respectivamente

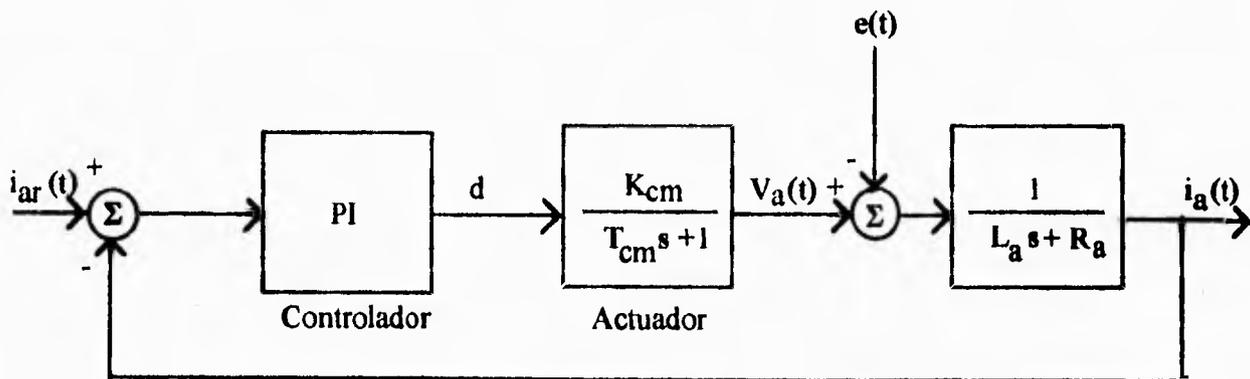


**Fig 3.11** Máscara del control de flujo

### Control de par y limitación de corriente

Uno de los requisitos de diseño del minibus eléctrico, es que la variable principal del motor a controlar sea el par [2]. Esto es por seguridad, ya que si el comando que sale del pedal que controla el conductor del vehículo es de velocidad y el conductor suelta o libera el pedal cuando el autobús se encuentra en movimiento, se produciría un paro brusco del mismo; y además porque este modo de operación es parecido al de un motor de combustión interna.

Al existir una relación directa entre el par generado por un motor de CD y la corriente de armadura dada por la ec 3.11, y debido al alto costo de los sensores de par, normalmente el comando de éste se realiza mediante un lazo de control de la corriente de armadura. Para el diseño de este lazo, se adopta un modelo simplificado considerando al efecto de la fuerza contraelectromotriz del motor como una perturbación y asumiendo que el voltaje de baterías es constante; el actuador se representa simplemente como una ganancia  $K_{cm}$  y una dinámica de primer orden con constante de tiempo  $T_{cm}$ . Como se indica en [10], los controladores típicos para estos equipos son controladores proporcionales e integrales o controladores PI. Con la aplicación de estos controladores se logra obtener una ganancia de lazo lo suficientemente grande como para rechazar la perturbación  $e(t)$  y, por supuesto, hacer al sistema insensible a variaciones en los parámetros del sistema. El esquema de control de corriente se muestra en la Fig 3.12.



**Fig 3.12** Lazo de control de corriente

Esta alta ganancia hace además muy rápida la respuesta de la dinámica del sistema en lazo cerrado; tanto que, según la ref 10, ésta no depende de la dinámica eléctrica del motor ni de la del controlador, únicamente de la del actuador ( $T_i'$ ), la que es muy pequeña (valores del

orden de unos cuantos milisegundos). De acuerdo con la misma referencia (p 192), una buena aproximación del sistema en lazo cerrado de la Fig 3.12 es:

$$G'(s) = \frac{1}{T_i' s + 1} \quad (3.24)$$

Por lo anterior, se justifica despreciar la dinámica eléctrica del motor en lazo cerrado, lo que valida la ec 3.16. Así, puede asumirse que la corriente de armadura  $i_a(t)$  siempre es igual a la corriente de referencia  $i_{ar}(t)$ , y ya que existe una relación directa entre la corriente de armadura y el par, la referencia de par  $T_{er}(t)$ , y el par mecánico de origen eléctrico del motor  $T_{me}(t)$ , también tienen que ser iguales en todo momento.

$$T_{me}(t) = T_{er}(t) \quad (3.25)$$

Ahora bien, el control del que está provisto el inversor debe limitar la corriente en el motor para evitar que ésta exceda su valor máximo permisible, lo que a su vez limitará al par eléctrico del motor. La limitación de par por la corriente máxima permisible en la máquina eléctrica, de acuerdo con la ec 3.11, está dada por la siguiente desigualdad:

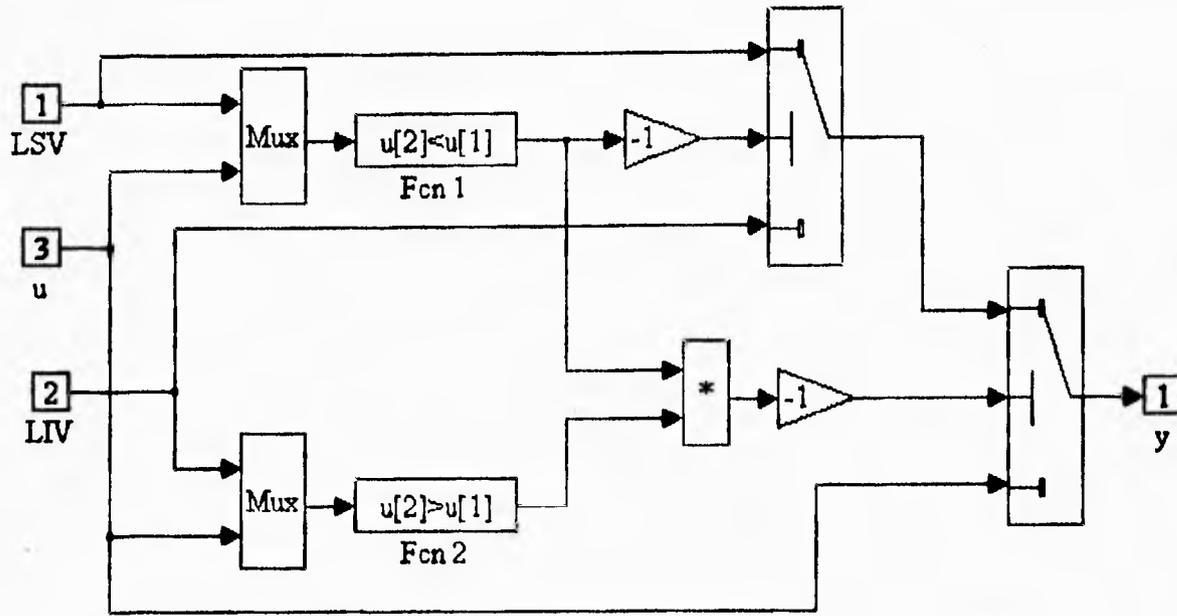
$$K_e \Phi(t) i_{amín} \leq T_{me}(t) \leq K_e \Phi(t) i_{amáx} \quad (3.26)$$

En la desigualdad anterior, se considera la posibilidad de que la corriente máxima negativa ( $i_{amín}$ ) sea diferente en magnitud que la corriente máxima positiva ( $i_{amáx}$ ).

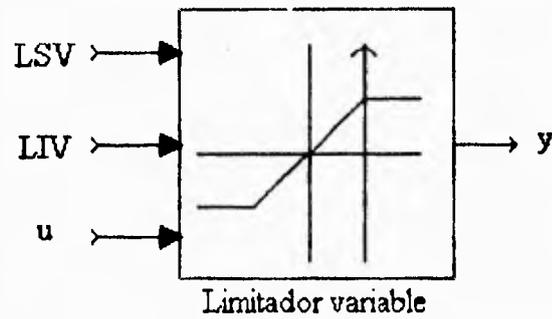
Para poder realizar la limitación de par, se crea un nuevo bloque llamado *Limitador Variable* cuya función es la de limitar la variable de entrada al bloque ( $u$ ) a un valor entre un límite máximo (LSV) y uno mínimo (LIV), ambos variables, como se indica a continuación:

$$y = \begin{cases} \text{LSV}, & u \geq \text{LSV} \\ u, & \text{LIV} < u < \text{LSV} \\ \text{LIV}, & u \leq \text{LIV} \end{cases} \quad (3.27)$$

La manera de implantar un limitador variable se muestra en la Fig 3.13 y su identificador asociado en la Fig 3.14.

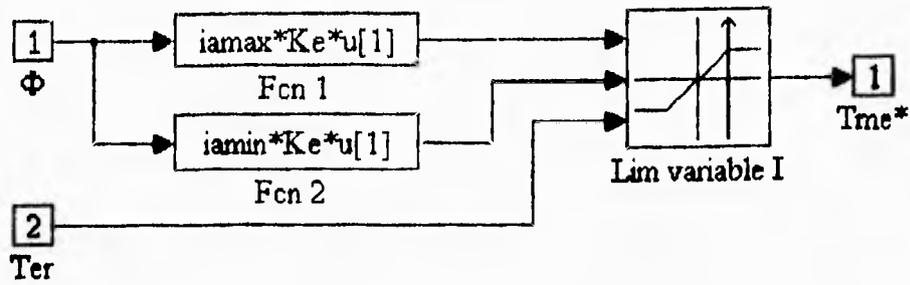


**Fig 3.13** Limitador variable

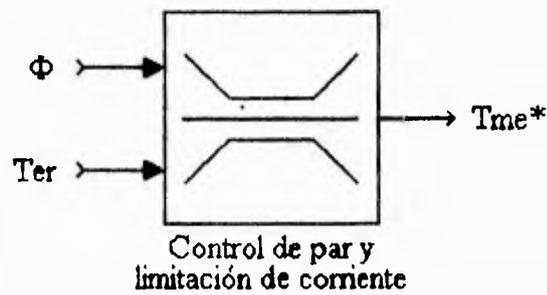


**Fig 3.14** Máscara del bloque *Limitador Variable*

La realización en SIMULINK del control de par y limitador de corriente (que es de hecho la implantación de la desigualdad 3.26) se presenta en la Fig 3.15; donde *Fcn 1* y *Fcn 2* calculan los límites superior e inferior variables de la desigualdad, respectivamente.



**Fig 3.15** Implantación del control de par y limitación de corriente



**Fig 3.16** Máscara del bloque *Control de par y limitación de corriente*

En el caso concreto del minibús, se consideró la magnitud de  $i_{am\acute{a}x}$  e  $i_{am\acute{i}n}$  igual a la corriente máxima del inversor, o sea:

$$i_{am\acute{a}x} = 150 \text{ A}$$

$$i_{am\acute{i}n} = -150 \text{ A}$$

### Modelo del actuador

Como ya se mencionó, el actuador del motor de inducción es un inversor dotado de control vectorial de campo orientado. Ya que se ha usado un modelo de motor de CD equivalente, el modelo del actuador que se instrumenta en las simulaciones es el de un convertidor CD-CD equivalente.

Como una primera aproximación se considera un convertidor ideal, esto es, sin pérdidas y con una dinámica despreciable. Las ecuaciones constitutivas del convertidor CD-CD ideal son [11]:

$$\frac{V_a(t)}{V_b(t)} = d(t) \quad (3.28)$$

$$\frac{i_b(t)}{i_a(t)} = d(t) \quad (3.29)$$

Donde  $V_b(t)$  e  $i_b(t)$  son el voltaje y corriente del banco de baterías respectivamente,  $V_a(t)$  e  $i_a(t)$  son el voltaje y corriente de armadura del motor de CD equivalente y,  $d(t)$  es una relación de transformación llamada ciclo de trabajo cuyo comportamiento varía entre dos límites de acuerdo con la siguiente expresión:

$$D_L \leq d(t) \leq D_H$$

En general, para la aplicación de este tipo de convertidores en transporte eléctrico,  $D_L=0$  y  $D_H=1$ .

Al combinar las ecuaciones 3.11, 3.25 y 3.28 se obtiene la siguiente relación:

$$d(t) = \frac{\frac{R_a T_e(t)}{K_e \Phi(t)} + e(t)}{V_b(t)} \quad (3.30)$$

Al aplicar las restricciones señaladas para  $d(t)$  en la ecuación anterior, se obtienen los límites impuestos por el convertidor CD-CD al par eléctrico del motor:

$$\frac{(D_L V_b(t) - e(t)) K_e \Phi(t)}{R_a} \leq T_e(t) \leq \frac{(D_H V_b(t) - e(t)) K_e \Phi(t)}{R_a} \quad (3.31)$$

La corriente que se demandará a las baterías se calcula a partir de las ecs 3.29 y 3.30

$$i_b(t) = \frac{\frac{RaTe(t)}{K_e\Phi(t)} + e(t)}{V_b(t)} i_a(t) \quad (3.32)$$

La implantación en SIMULINK del convertidor CD-CD se presenta en la siguiente figura:

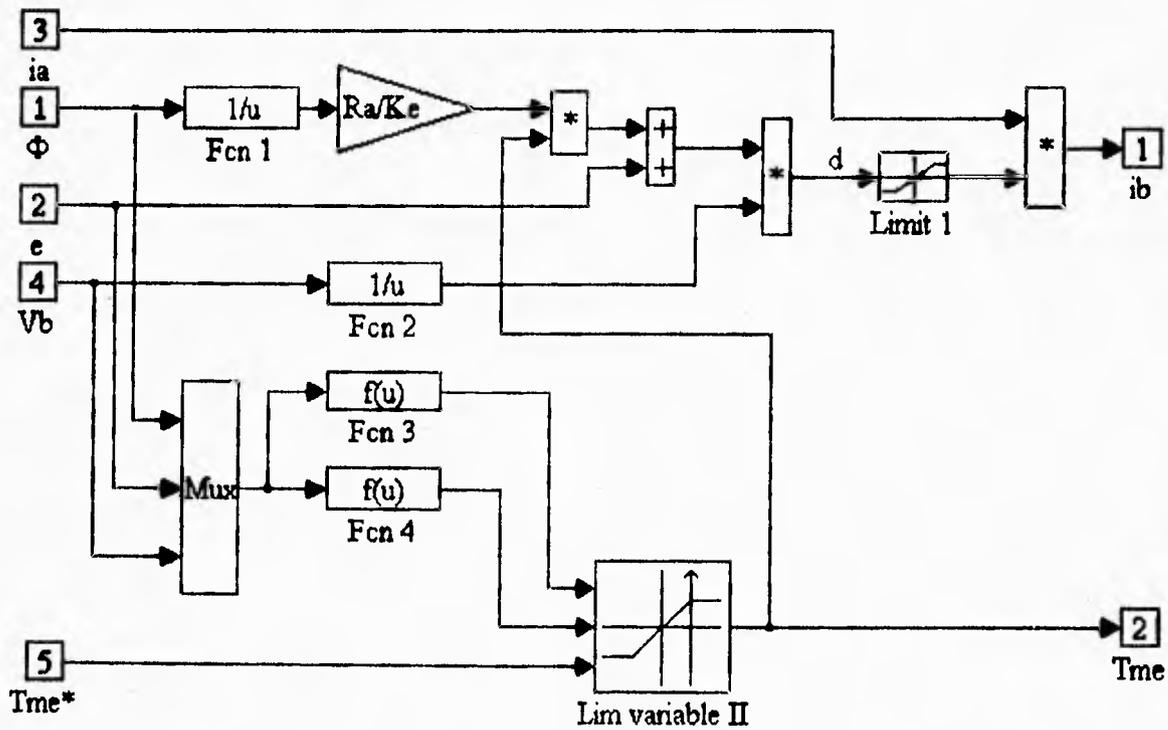


Fig 3.17 Controlador CD-CD

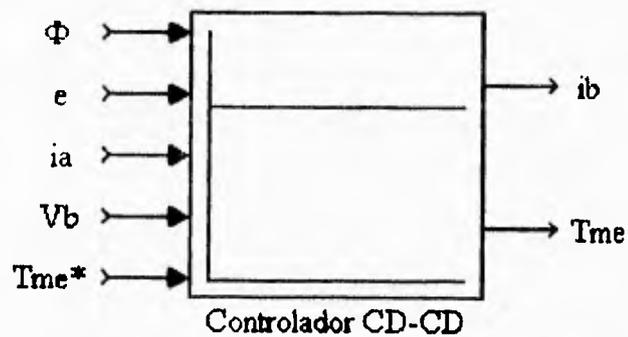


Fig 3.18 Máscara del bloque *Controlador CD-CD*

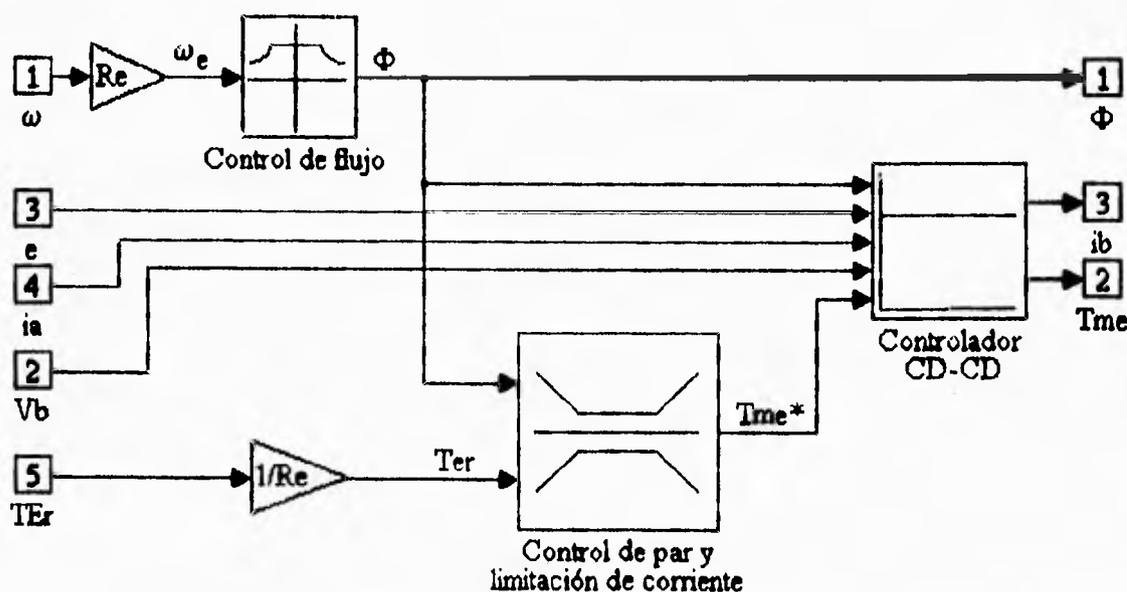
Los bloques *Mux*, *Fcn 2* y *Fcn 3* contienen la implantación de los límites variables de la desigualdad 3.31. *Fcn 2* evalúa el límite superior de la desigualdad y *Fcn 3* el inferior.

### Integración de los controladores y el actuador

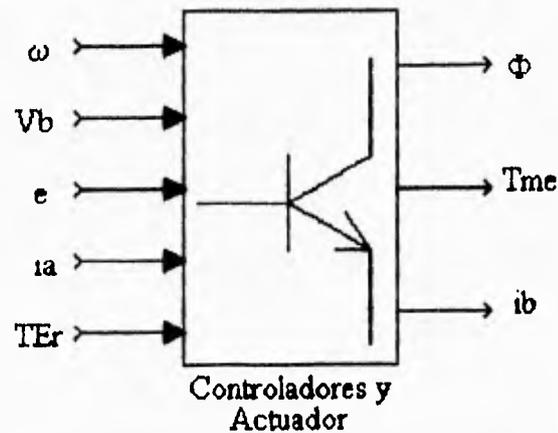
Por convención, para poder comparar los pares de los diferentes sistemas de tracción (aunque en este trabajo se está considerando sólo el sistema de tracción eléctrico) y el par de frenado disipativo en un mismo punto de accionamiento en el tren de transmisión, se decidió referenciar todos los pares de comando al eje cardán; esto es, después de los reductores y antes del diferencial. Así el par de referencia para el sistema eléctrico referido al eje cardán se define como  $T_{Er}(t)$  y está relacionado con el par de referencia referido a la flecha del motor por medio del reductor  $R_e$  como se muestra en la siguiente ecuación:

$$T_{Er}(t) = R_e T_e(t) \quad (3.33)$$

Finalmente, se integra un bloque llamado *Controladores y Actuador* como se muestra en las Figs 3.19 y 3.20:



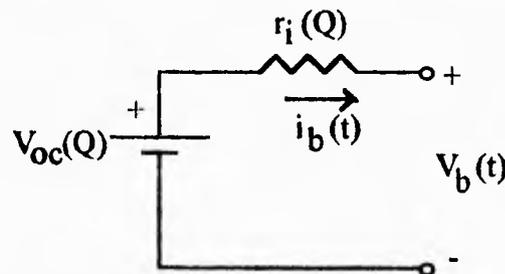
**Fig 3.19** Implantación del bloque *Controladores y Actuador*



**Fig 3.20** Máscara del bloque *Controladores y Actuador*

### 3.4.3 Modelo del Banco de baterías

El banco de baterías del minibús UNAM, está compuesto por baterías de plomo ácido [2], que continúan siendo el tipo de baterías más ampliamente usado en vehículos eléctricos. Para obtener el modelo de dicho banco de baterías, se adoptó el modelo propuesto por F. Wicks y D. Marchionne para baterías de este tipo [12], el cual se muestra en la Fig 3.21. Este modelo se desarrolló con base en pruebas y resultados experimentales y está compuesto de una fuente de tensión de corriente directa conectada en serie con una resistencia parásita, llamada resistencia interna de la batería. Tanto el valor de la fuente como el de la resistencia están en función del estado de carga de la batería.



**Fig 3.21** Modelo de la batería

donde:

- $Q(i_b)$  - Descarga de la batería, Ah
- $V_{oc}(Q)$  - Voltaje de la batería en circuito abierto, V

- $V_b(t)$  - Voltaje en los bornes de la batería, V
- $i_b(t)$  - Corriente en la batería, A
- $r_i(Q)$  - Resistencia interna de la batería,  $\Omega$

La unidad de descarga Ah, o ampere-hora, es la forma en que tradicionalmente se denota la capacidad de almacenamiento de energía en una batería. Para obtener dicha capacidad en unidades de energía es necesario multiplicar el valor en Ah por el voltaje de la batería en circuito abierto,  $V_{OC}$ , lo que resulta en unidades de energía: Wh o Watt-hora (que al ser multiplicada por el factor de conversión de horas a segundos se convierte en Joules, que es la unidad de energía el sistema internacional). Esta forma de indicar energía en Ah es un poco engañosa, ya que un grupo de baterías conectadas en serie tendrá la misma capacidad en Ah que cada unidad (lo que cambia es el voltaje); a diferencia de esto, la capacidad de un banco de baterías formado por la conexión de m baterías en paralelo, tendrá una capacidad en Ah de m veces la de cada unidad.

La capacidad de energía disponible en una batería ( $Q_{m\acute{a}x}$ ) disminuye de manera proporcional a la intensidad de corriente de descarga a la que esté sometida, y por tanto, con el inverso del tiempo de descarga; es por ello que los fabricantes de baterías proporcionan el dato de la capacidad asociado a un tiempo de descarga en Ah, siendo el más común (para aplicaciones convencionales) el de veinte horas. Para autos eléctricos el más recomendable es el de tres horas. Por lo tanto, para elegir las baterías adecuadas para una aplicación específica, es importante conocer la forma exacta en que se da esta disminución de capacidad con el tiempo de descarga, lo que debe consultarse con el fabricante.

El modelo que se emplea en este trabajo supone que  $Q_{m\acute{a}x}$  está dada para un tiempo de descarga de tres horas.

La descarga  $Q(i_b)$  se calcula como sigue:

$$Q(i_b) = \frac{1}{3600} \int_{Q_i}^{Q} i_b(t) dt \quad (3.34)$$

Según el modelo de Wicks-Marchionne, para una batería con las siguientes características:

- Número de celdas básicas en serie: 3
- Voltaje por celda básica: 2.2 V
- Voltaje de la batería: 6.6 V
- Peso de la batería: 31.75 kg
- Capacidad máxima de la batería: 200 A h

el comportamiento del voltaje en circuito abierto y el valor de la resistencia interna están dados por las ecuaciones 3.35 y 3.36.

$$V_{oc}(Q) = 6.6 - 1.25 \frac{Q(i_b)}{Q_{m\acute{a}x}} \quad (3.35)$$

$$r_i(Q) = 0.00595 + 0.00975 \frac{Q(i_b)}{Q_{m\acute{a}x}} \quad (3.36)$$

Donde  $Q_{m\acute{a}x}$  es la capacidad máxima que puede almacenar la batería expresada en Ah.

Para poder adaptar este modelo a otras baterías de plomo ácido, entre ellas las seleccionadas para el ME, se modifican las ecuaciones anteriores para obtener expresiones en función del número de bancos de baterías conectados en paralelo ( $n_p$ ), que se denominarán bancos básicos, así como del número de celdas básicas de 2.2 V conectadas en serie ( $n_s$ ) en cada banco básico. Aquí cabe aclarar que las características de las celdas básicas empleadas en el modelo de Wicks-Marchionne son relativamente parecidas entre diferentes tipos de baterías de plomo ácido. Así, se generan las ecuaciones 3.37 y 3.38 que representan las características del voltaje en circuito abierto y resistencia interna de  $n_p$  bancos básicos conectados en paralelo, compuestos cada uno por  $n_s$  celdas básicas conectadas en serie.  $Q_{m\acute{a}x}$  representa ahora (en las ecuaciones 3.37 y 3.38) la capacidad máxima del banco total, y  $Q'_{m\acute{a}x}$  denotará la capacidad máxima de cada celda básica (o lo que es lo mismo, de cada unidad de batería) y  $Q(i_b)$  es la descarga del banco total.

$$V_{oc}(Q)|_{n_s, n_p} = n_s \left[ C1 - C2 \frac{Q(i_b)}{Q_{m\acute{a}x}} \right] \quad (3.37)$$

$$r_i(Q) \Big|_{n_s, n_p} = \frac{n_s}{n_p} \left[ C3 + C4 \frac{Q(i_b)}{Q_{\text{máx}}} \right] \quad (3.38)$$

donde:

$$Q_{\text{máx}} = n_p Q'_{\text{máx}}$$

$Q'_{\text{máx}}$  = capacidad de cada batería en Ah

$$C1 = 2.2$$

$$C2 = 0.4167$$

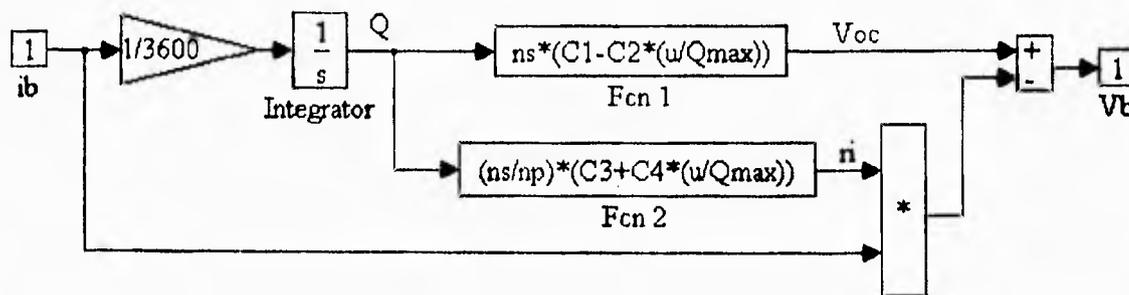
$$C3 = 0.00198$$

$$C4 = 0.00325$$

$Q(i_b)$  en las expresiones 3.37 y 3.38 se continua calculando de acuerdo con la ec 3.34.

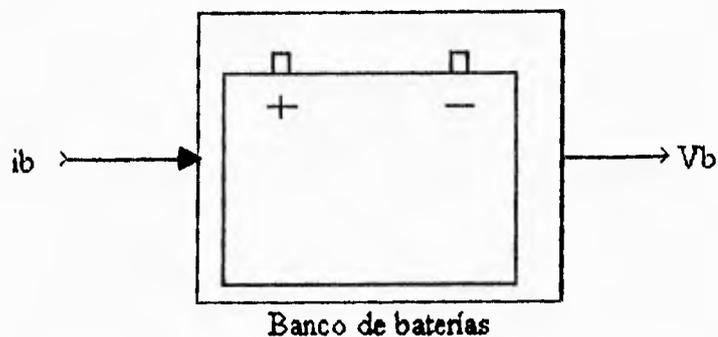
Las baterías que tienen como tensión nominal 12 V están normalmente formadas por 6 celdas básicas, por lo que su voltaje en circuito abierto con carga máxima será de aproximadamente 13.2 V.

El diagrama de SIMULINK que resulta de la implantación de las ecs 3.37 y 3.38 se muestra en la Fig 3.22, y en la Fig 3.23 el de la máscara correspondiente.



**Fig 3.22** Modelo del banco de baterías

Dentro del bloque integrador de la Fig 3.22 se declara la condición inicial de descarga de la batería ( $Q_i$ ).

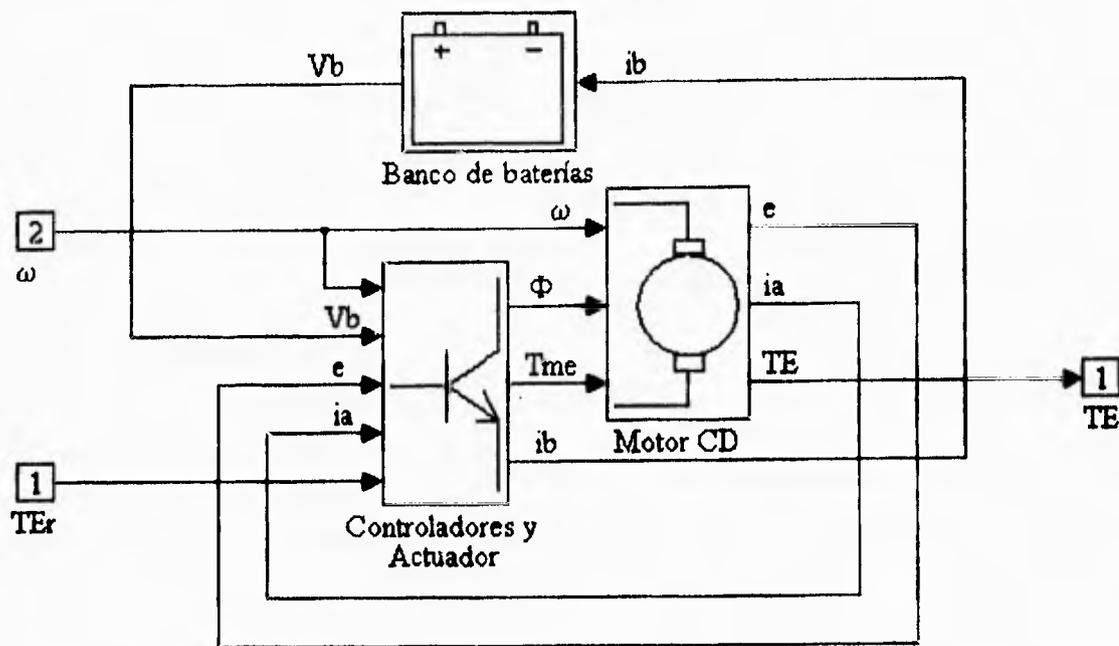


**Fig 3.23** Máscara del modelo del banco de baterías

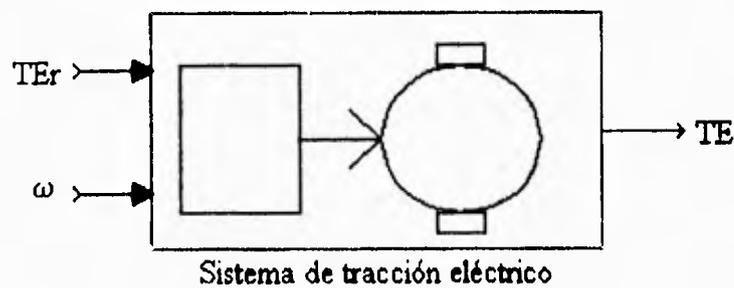
El minibús contará con dos bancos básicos conectados en paralelo ( $n_p=2$ ), formado cada uno por 24 baterías de 12 V conectadas en serie, teniendo cada banco un voltaje nominal en circuito abierto de 288 V. Con el dato del número de baterías en serie, se calcula que el número de celdas básicas que forman un banco básico es de  $n_s=144$ . La capacidad máxima de cada batería (de acuerdo con los datos del fabricante) es de 100 Ah a tres horas de descarga. La capacidad máxima del banco de baterías total del minibús será de 200 Ah.

### **Integración del sistema de tracción eléctrico**

Una vez definidos los modelos del sistema eléctrico del vehículo: motor de CD, actuador, controladores y por último el del banco de baterías, es posible la integración de todos ellos para formar el sistema eléctrico del vehículo tal como se muestra en la figura que sigue:



**Fig 3.24** Integración del sistema de tracción eléctrico



**Fig 3.25** Máscara del Sistema de tracción eléctrico

### 3.5 *Generador de ciclos de conducción*

#### 3.5.1 *Ciclos de conducción*

Los ciclos de conducción son perfiles de velocidad en función del tiempo que se desea siga el vehículo y perfiles de pendiente en función del desplazamiento a los que estará sometido el mismo durante un recorrido determinado.

La información de los ciclos de conducción para proveer la velocidad de referencia que se desea siga el modelo, y la información de la pendiente en la que se desempeña el vehículo, deben estar disponibles en el espacio de trabajo de MATLAB en forma de vectores de velocidad y tiempo relacionados unívocamente y, obviamente, de la misma dimensión, así como en vectores de pendiente y distancia de dimensiones iguales y con sus elementos relacionados uno a uno. Los vectores de tiempo y distancia deben ser monotónicamente crecientes. Los datos que forman los vectores están en unidades del sistema internacional. A estos vectores se les han dado los nombres de  $\mathbf{vr}$ ,  $\mathbf{t}$ ,  $\mathbf{teta}$  y  $\mathbf{x}$ , para la velocidad, tiempo, pendiente y distancia respectivamente. Los ciclos de conducción se pueden dividir en:

a) Ciclos de conducción experimentales

b) Ciclos de conducción ideales

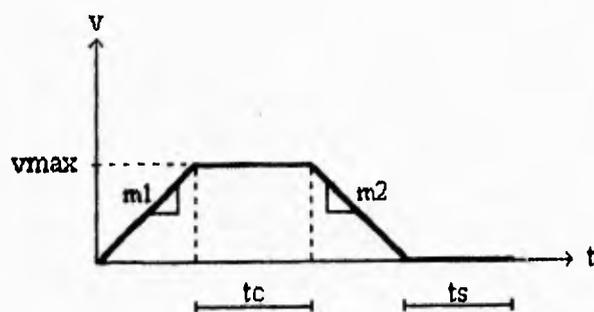
Los ciclos de conducción experimentales son un conjunto ordenado de muestras de tiempo, velocidad, distancia y pendiente, adquiridas durante una prueba de campo en un vehículo acondicionado para tal propósito (para usar esta información en el simulador, estos datos se asignan a los vectores  $\mathbf{t}$ ,  $\mathbf{vr}$ ,  $\mathbf{x}$  y  $\mathbf{teta}$  respectivamente).

Los ciclos de conducción ideales se pueden dividir en dos tipos:

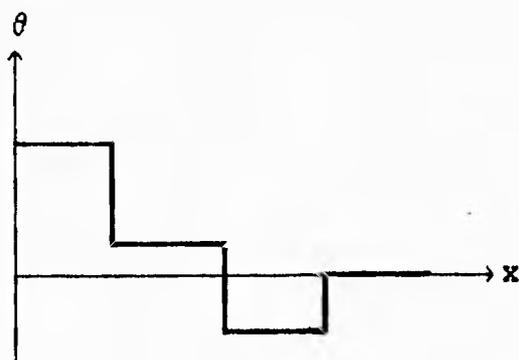
a) Ciclos ideales básicos

b) Ciclos ideales SAE

En un ciclo de conducción ideal básico el perfil de velocidad presenta cuatro etapas básicas, de ahí su nombre, y son las siguientes: una etapa de aceleración con valor  $m_1$  que se mantiene hasta que se alcanza el valor de velocidad máxima  $V_{m\acute{a}x}$ ; una etapa de velocidad constante ( $V_{m\acute{a}x}$ ) que dura un tiempo constante  $t_c$ ; otra de desaceleración con valor absoluto  $m_2$  y finalmente una etapa de paro total con duración  $t_s$ . El perfil de pendiente en un ciclo de conducción básico está formado por etapas de pendiente constante en intervalos de distancia variables. Un ciclo de conducción ideal básico típico se presenta en las siguientes dos figuras:



**Fig 3.26** Perfil de velocidad en un ciclo de conducción básico

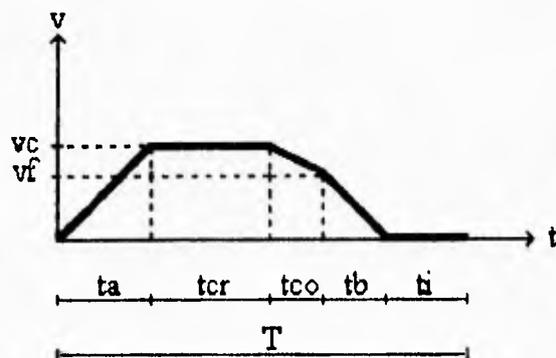


**Fig 3.27** Perfil de pendiente en un ciclo de conducción básico

Los ciclos de conducción ideales de la SAE (*Society of Automotive Engineers*) son estándares aprobados por dicha sociedad para fines de comparación de desempeño entre vehículos eléctricos bajo un patrón fijo de operación. Los ciclos SAE se dividen en cuatro patrones, todos para condiciones de pendiente cero (en plano) y donde cada uno de ellos responde a una aplicación del vehículo distinta (camión repartidor, automóvil particular, etc.).

Los ciclos SAE están compuestos de cuatro etapas, la primera, que dura un tiempo  $t_a$  es de una aceleración constante, la segunda es de velocidad constante ( $v_c$ ) y dura un tiempo  $t_{cr}$ , la tercera es una etapa de marcha libre (*coast*), esto es, sin par de tracción dejando al vehículo

rodar libremente, por un tiempo  $t_{CO}$ ; en la cuarta etapa que dura un tiempo  $t_b$ , el vehículo frena con un valor de desaceleración constante; en la quinta y última etapa, el vehículo permanece en paro total durante un tiempo  $t_i$ . Estas etapas se muestran en la fig 3.28.



**Fig 3.28** Perfil de velocidad de un ciclo de conducción SAE

A continuación se describen los cuatro patrones de conducción y su asociación con la aplicación del vehículo [13]:

1) *Ciclo de conducción A.* - Se caracteriza por tener una velocidad crucero de 16 km/h (10 mph) y se propone su empleo en la prueba de vehículos diseñados para operar bajo rutas fijas con una alta frecuencia de paradas y arranques (por ejemplo, una camioneta de entrega postal en zonas residenciales, un camión repartidor de leche, etc.).

2) *Ciclo de conducción B.* - Este ciclo se caracteriza por tener una velocidad crucero de 32 km/h (20 mph) y se propone su empleo en la prueba de vehículos diseñados para operar en una ruta fija con una frecuencia intermedia de paros y arranques (por ejemplo un camión repartidor de panadería, un autobús que hace trayectos cortos entre dos puntos (*shuttle bus*), etc.).

3) *Ciclo de conducción C.* - Este ciclo de conducción se caracteriza por tener una velocidad crucero de 48 km/h (30 mph) y se propone su empleo en la prueba de vehículos diseñados para ser operados bajo rutas variables con frecuencias intermedias de paradas y arranques (por ejemplo, una camioneta de servicio postal, un camión repartidor de mercancía, etc.).

4) *Ciclo de conducción D.*- Este ciclo de conducción se caracteriza por demandar una velocidad crucero de 72 km/h (45 mph) y se propone su empleo en la prueba de vehículos diseñados para ser operados bajo una ruta variable en paradas y arranques, típica de zonas suburbanas (por ejemplo un automóvil particular, etc.).

Los valores de los parámetros que definen a cada tipo de ciclo SAE se resumen en la Fig 3.29.

Tipo de ciclo	A	B	C	D
$v_c$ (km/h)	$16 \pm 1.5$	$32 \pm 1.5$	$48 \pm 1.5$	$72 \pm 1.5$
$t_a$ (s)	$4 \pm 1$	$19 \pm 1$	$18 \pm 2$	$28 \pm 2$
$t_{cr}$ (s)	0	$19 \pm 1$	$20 \pm 1$	$50 \pm 2$
$t_{co}$ (s)	$2 \pm 1$	$4 \pm 1$	$8 \pm 1$	$10 \pm 1$
$t_h$ (s)	$3 \pm 1$	$5 \pm 1$	$9 \pm 1$	$9 \pm 1$
$t_j$ (s)	$30 \pm 2$	$25 \pm 2$	$25 \pm 2$	$25 \pm 2$
T (s)	$39 \pm 2$	$72 \pm 2$	$80 \pm 2$	$122 \pm 2$

**Fig 3.29** Tipos de ciclos SAE

Para el caso particular del ME, el ciclo de conducción SAE propuesto es el tipo B.

Existe un pequeño problema para el uso de los ciclos ideales SAE en el simulador, el cual consiste en que el comportamiento de la velocidad durante la marcha libre no puede preverse antes de una simulación, pues ésta depende de las características del vehículo y de las condiciones de la simulación. Para solucionar este problema se propone aproximar el comportamiento de la velocidad en marcha libre por una recta (tal como se ilustra en la Fig 3.28) que va de  $v_c$  a  $v_f$  (que es la velocidad al final de la marcha libre). El valor de  $v_f$  se obtiene de una simulación parcial del ciclo SAE, en la que la etapa de marcha libre se consigue forzando el par de tracción a cero, y al final de la cual, se detiene la simulación. El valor de  $v_f$  es el último elemento de un vector que se envía al espacio de trabajo de MATLAB con el bloque *To Workspace*.

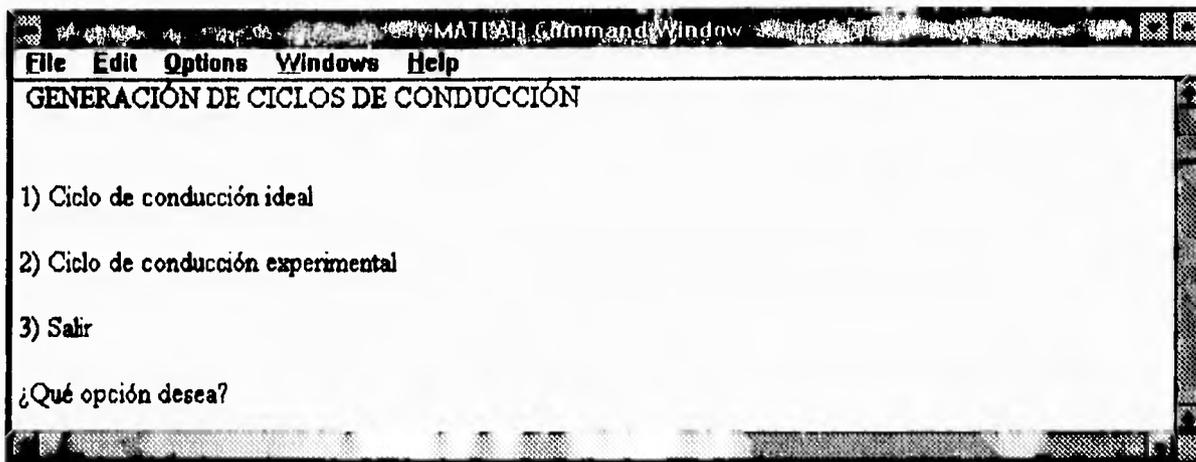
### ***3.5.2 Programa para la construcción de ciclos de conducción***

Los vectores **t**, **vr**, **x**, y **teta** que contienen la información de los ciclos de conducción ideales, se construyen por medio de un programa llamado **ciclos.m**, que se carga en el ambiente de trabajo de MATLAB, y que al ser ejecutado auxilia al usuario a crear ciclos de conducción ideales ya sean del tipo básico o SAE, o bien, a manejar apropiadamente la información adquirida en pruebas de campo para formar los ciclos de conducción experimentales. La información del ciclo generado queda almacenada en el espacio de trabajo de MATLAB lista para ser utilizada en una simulación por el bloque *Generador de ciclos de conducción* cuya implantación se atiende más adelante.

Si se elige en el programa **ciclos.m** crear un perfil de velocidad tipo SAE, es necesario ejecutar dos veces el programa. En la primera ejecución, se prepara la identificación de la velocidad final de marcha libre. Esto es, se crea un ciclo de conducción tipo SAE parcial, en el que están determinadas sólo las etapas de aceleración y velocidad constante. Con base en los datos anteriores se lleva a cabo una simulación (la ejecución de las simulaciones se atiende en secciones posteriores) en la que la etapa de marcha libre se logra forzando a cero al par de los sistemas de tracción que entran al bloque del tren de transmisión así como a la magnitud del par disipativo. Esta simulación tiene como objetivo identificar la velocidad final de marcha libre. Dicha simulación se detiene automáticamente una vez efectuada la identificación de  $v_f$ . Una vez hecha la identificación, se ejecuta por segunda vez el programa, lo que construye el perfil de velocidad completo del ciclo SAE seleccionado. En el apéndice A se presenta el listado del programa **ciclos.m**. A continuación se describe la manera en que se utiliza el programa.

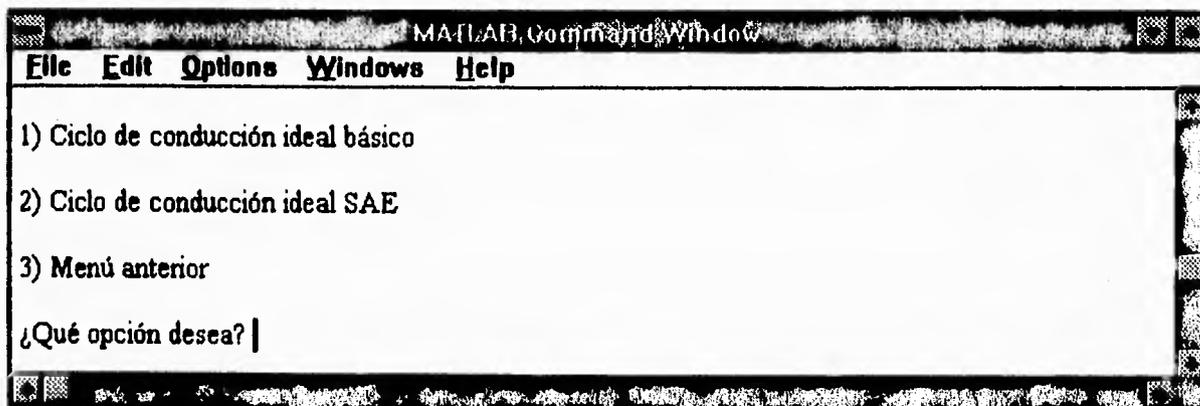
### Uso del programa generador de ciclos de conducción

El generador de ciclos se pone en funcionamiento al ejecutar el programa **ciclos.m** desde el espacio de trabajo de MATLAB. Al ejecutar dicho programa se presenta el siguiente menú:



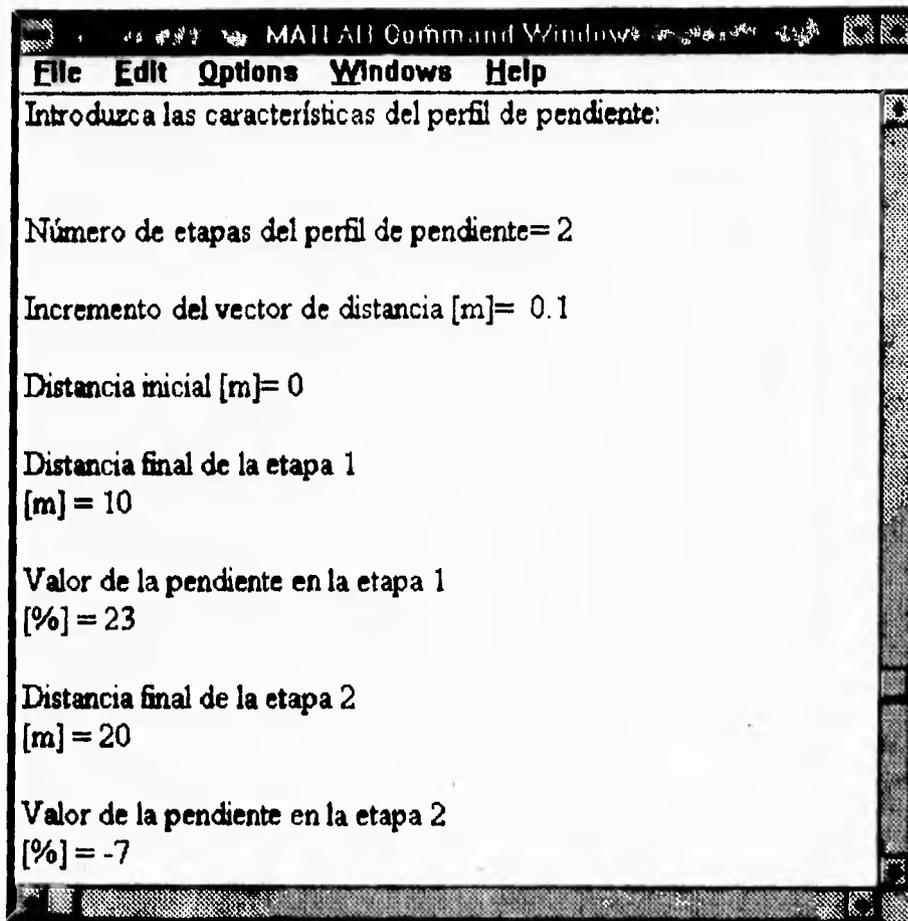
**Fig 3.30** Menú principal del generador de ciclos de conducción

Si se elige generar la opción: *1) Ciclo de conducción ideal*, se genera la pantalla que se muestra a continuación:



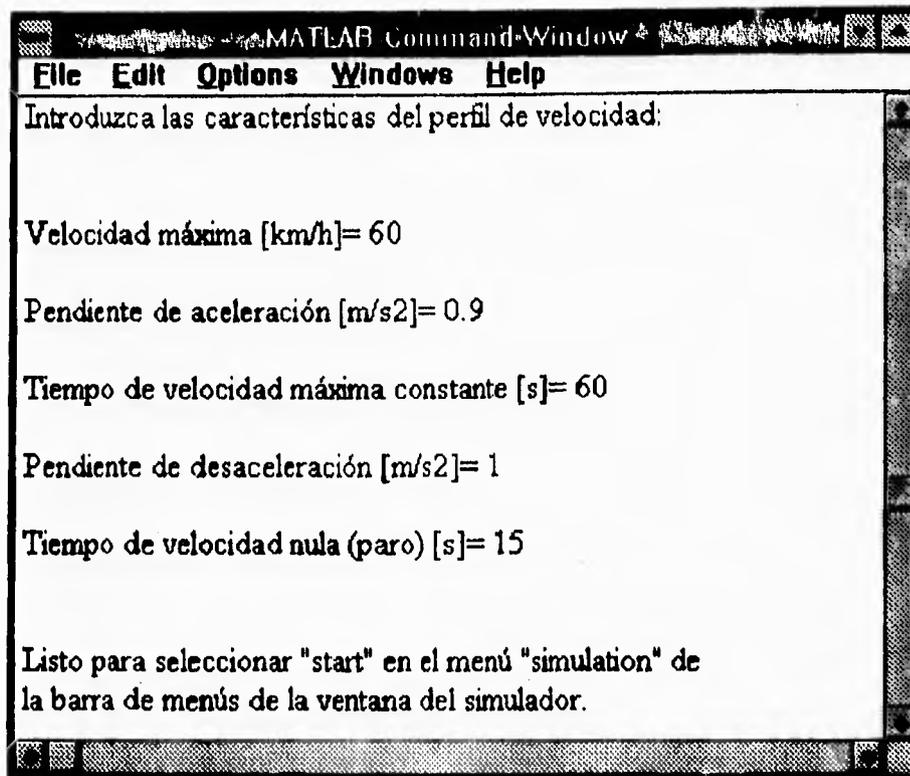
**Fig 3.31** Menú de ciclos de conducción ideales

Si se elige la opción 1, se ha optado por generar un ciclo de conducción básico y el programa pregunta por las características del perfil de pendiente como en el siguiente ejemplo:



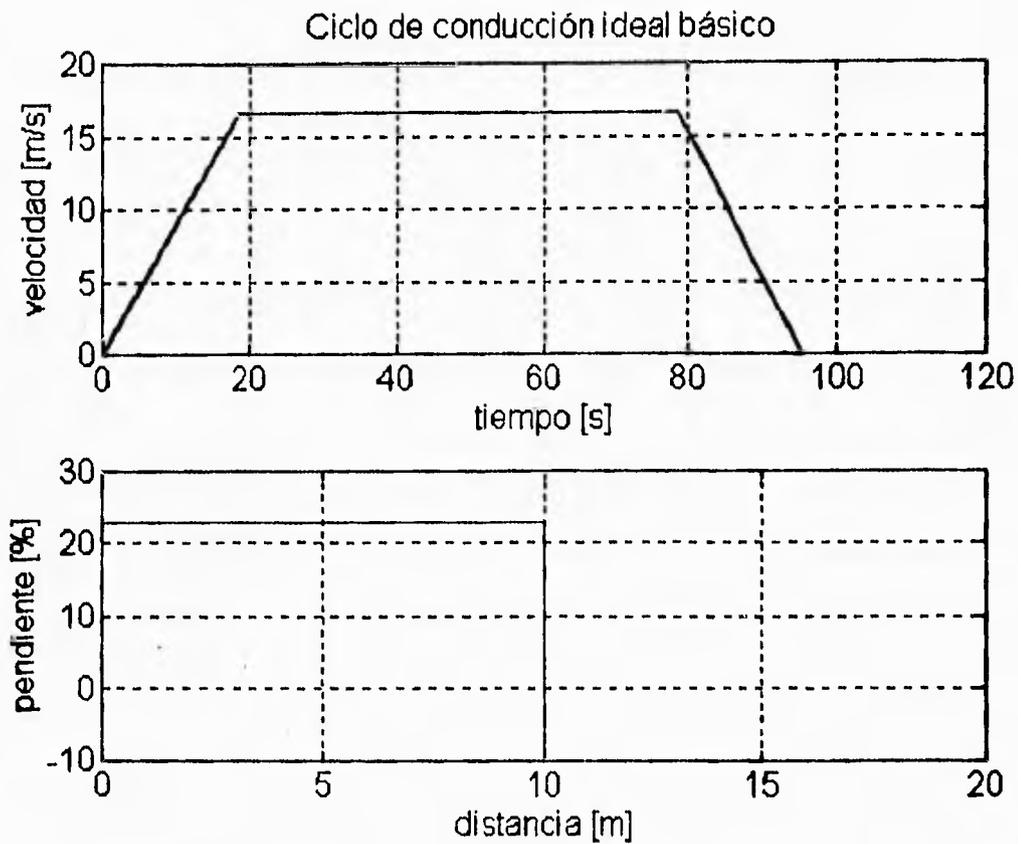
**Fig 3.32** Ejemplo de un perfil de pendiente

Una vez finalizada la asignación de los valores del perfil de pendiente, el programa solicita los valores correspondientes al perfil de velocidad como se muestra en el siguiente ejemplo:



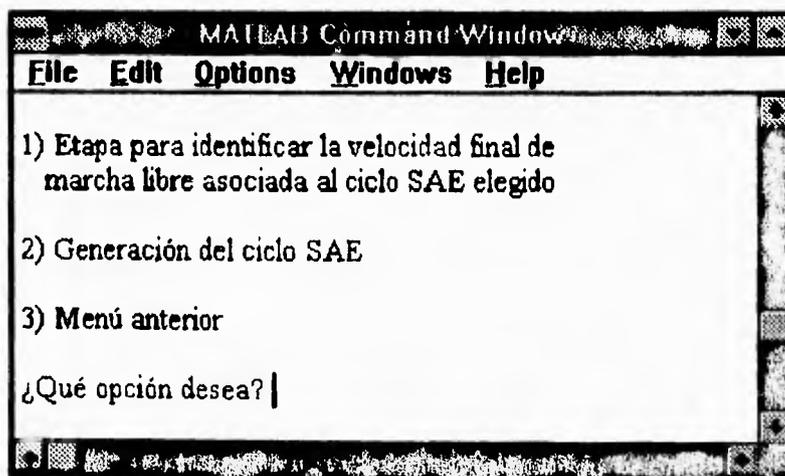
**Fig 3.33** Ejemplo de un perfil de velocidad básico

Al concluir con la caracterización del ciclo de conducción, el programa muestra de manera automática el ciclo generado (ver Fig 3.34), quedando el usuario en posición de poder realizar simulaciones.



**Fig 3.34** Ejemplo de un ciclo de conducción ideal básico generado

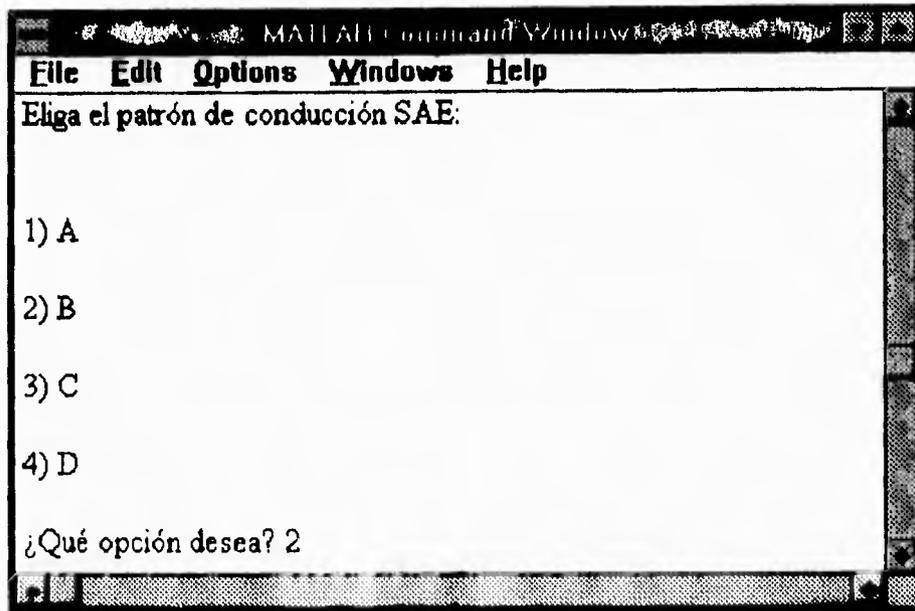
Ahora bien, si en el menú de ciclos de conducción ideales de la Fig 3.31 se elige generar un ciclo de conducción tipo SAE con la opción: 2) *Ciclo de conducción ideal SAE*, el programa presenta el siguiente menú:



**Fig 3.35** Menú del ciclo de conducción ideal SAE

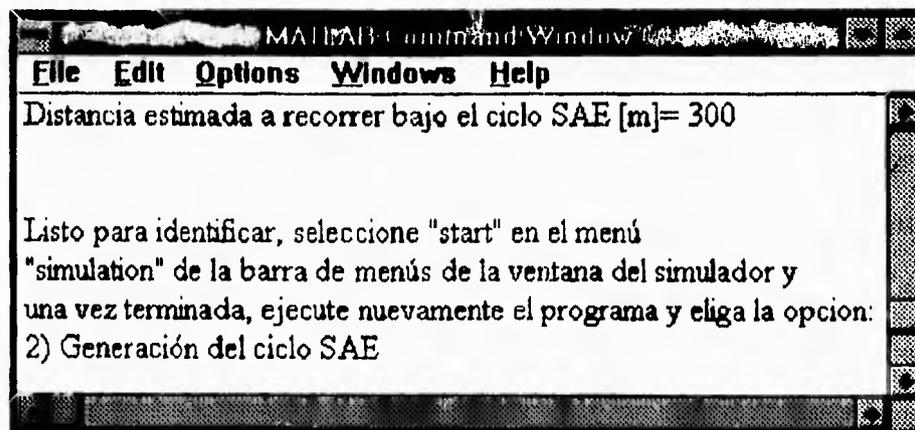
Es importante recordar que si se desea generar un ciclo de conducción SAE, el programa debe ejecutarse dos veces; en la primera ejecución debe elegirse la opción 1 del menú de ciclos de conducción ideales SAE, y en la segunda, deberá elegirse la opción 2 del mismo menú.

Una vez ejecutada la opción 1 del menú de la Fig 3.35, el programa pregunta por el patrón de conducción del ciclo SAE que se desea generar como se muestra en la figura siguiente:



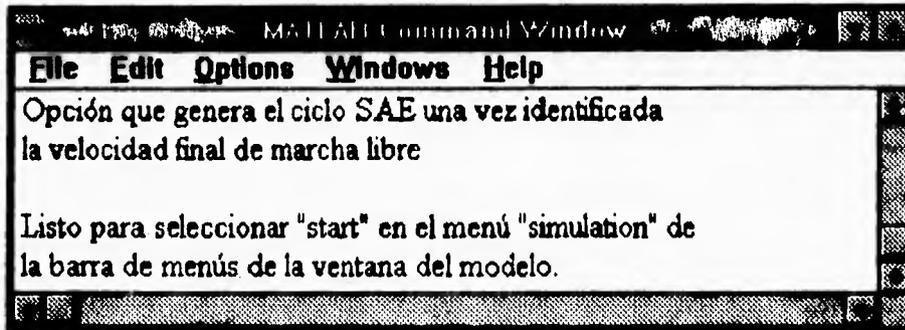
**Fig 3.36** Menú de patrones de conducción SAE

Una vez hecha la elección, (que en el caso anterior corresponde a un patrón tipo B), el programa pregunta por la distancia estimada a recorrer por el vehículo tal como se muestra en la siguiente pantalla:

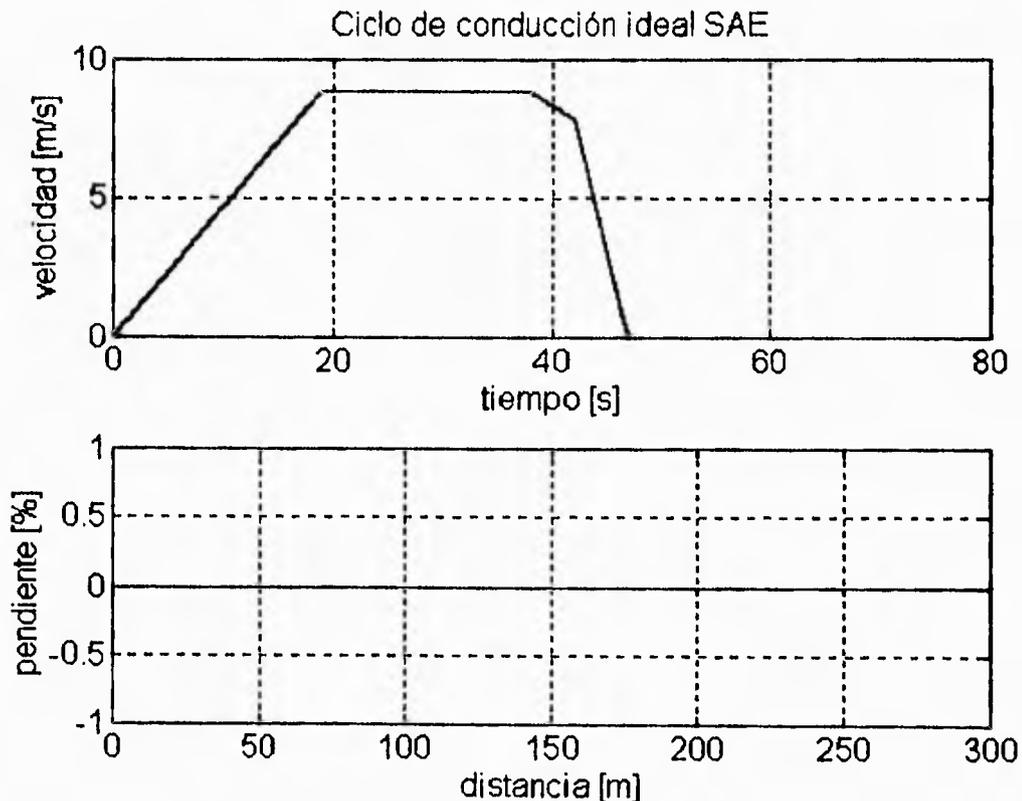


**Fig 3.37** Ejemplo de un ciclo SAE

Cabe recordar que la ejecución de un ciclo SAE es en condiciones de pendiente cero, por lo que el programa genera un vector de pendiente cero asociado a un vector de distancia que contendrá valores que van desde cero hasta la distancia estimada a recorrer bajo el ciclo SAE. Una vez identificada la velocidad final de marcha libre (producto de una simulación previa del modelo), se debe seleccionar la opción: 2) *Generación del ciclo SAE* de la Fig 3.35, lo que presenta la pantalla de la Fig 3.38, y se genera de manera automática el ciclo SAE deseado como se muestra en la Fig 3.39, que como ya se mencionó, en este ejemplo corresponde a un ciclo SAE tipo B:



**Fig 3.38** Pantalla de la opción: 2) *Generación del ciclo SAE*



**Fig 3.39** Ejemplo de un ciclo SAE tipo B generado

Ahora bien, si en el menú principal (Fig 3.30) se elige la opción: 2) *Ciclo de conducción experimental*, el programa presentará el siguiente menú:

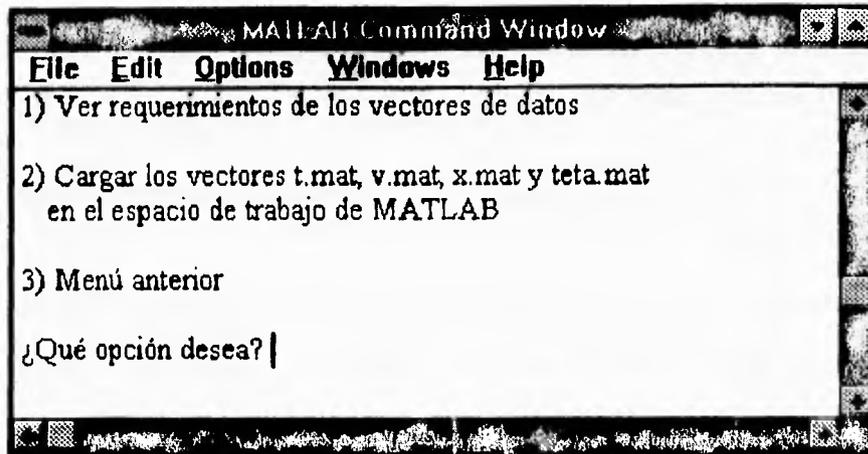


Fig 3.40 Menú de ciclos de conducción experimental

Si la opción 1 es seleccionada, se presenta información sobre como deben guardarse los datos experimentales en archivos *t.mat*, *v.mat*, *x.mat* y *teta.mat* como se muestra en la Fig 3.41; pulsando la tecla 'Return' se retorna al menú de la Fig 3.40.

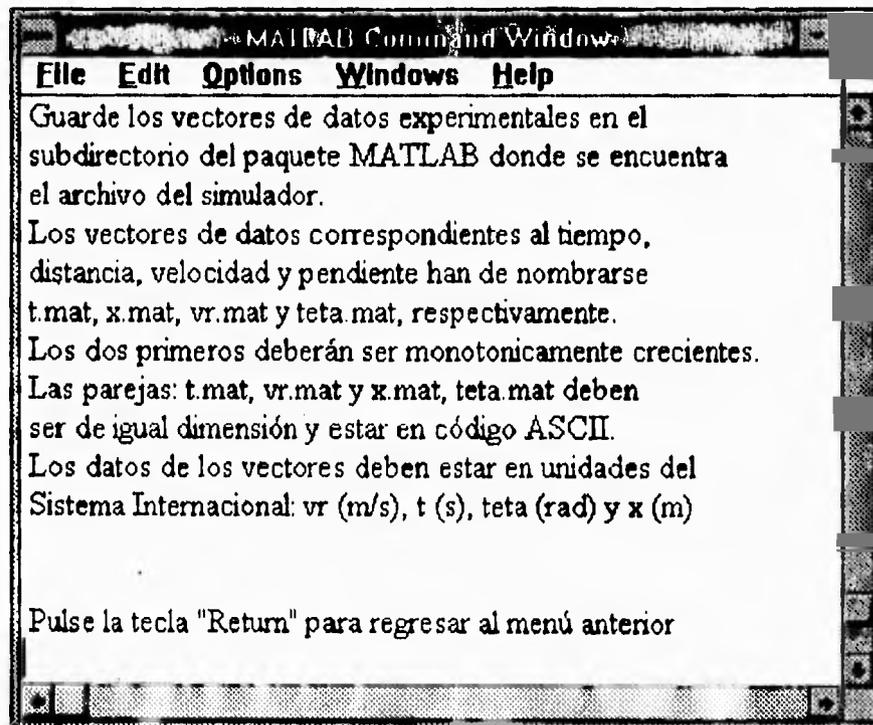
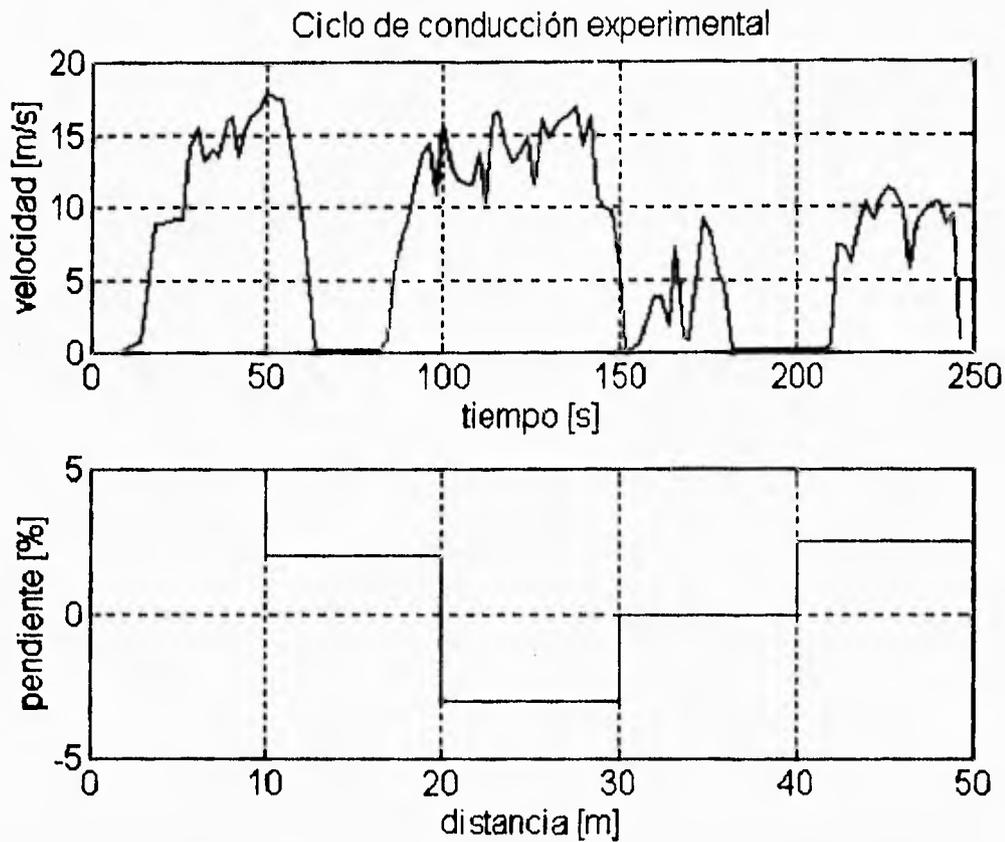
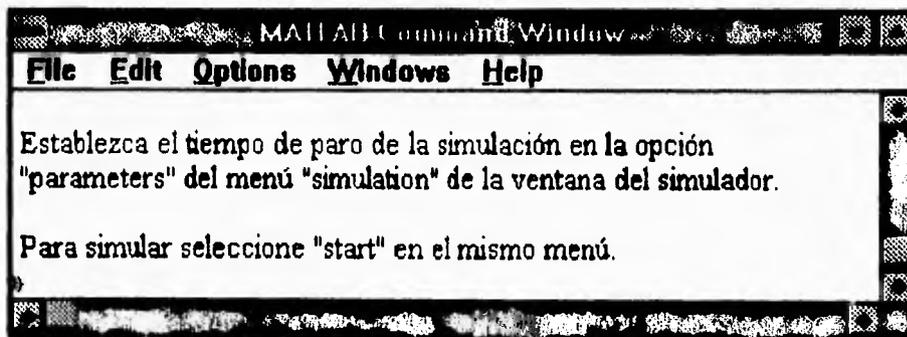


Fig 3.41 Información para almacenar el ciclo de conducción experimental

Al ejecutar la opción 2 de la Fig 3.40, los archivos se cargan en el espacio de trabajo de MATLAB. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de la presentación de datos experimentales:



**Fig 3.42** Ejemplo de un ciclo de conducción experimental



**Fig 3.43** Pantalla final para un ciclo de conducción experimental

Los pasos a seguir para la ejecución de simulaciones se verá en el inciso correspondiente más adelante.

### 3.5.3 Implantación del generador de ciclos de conducción

Se han descrito ya los ciclos de conducción y el programa que los construye y almacena en los vectores  $v_r$ ,  $t$ ,  $teta$  y  $x$ . Estos vectores son consultados durante una simulación, la información de la velocidad la utiliza como referencia un bloque llamado *Piloto* (que se describe en la siguiente sección) el cual comanda los sistemas de tracción y frenado para que el modelo siga dicho perfil de velocidad. La información de pendiente se usa en el bloque del sistema mecánico para el cálculo de las componentes del peso del vehículo. Dicha consulta se realiza mediante un bloque llamado *Generador de ciclos de conducción* el cual utiliza los bloques *Repeating Sequence* para el perfil de velocidad y *Look up Table* para el perfil de pendiente como se observa en la Fig 3.44, en este caso enmascarados por un perfil cualquiera.

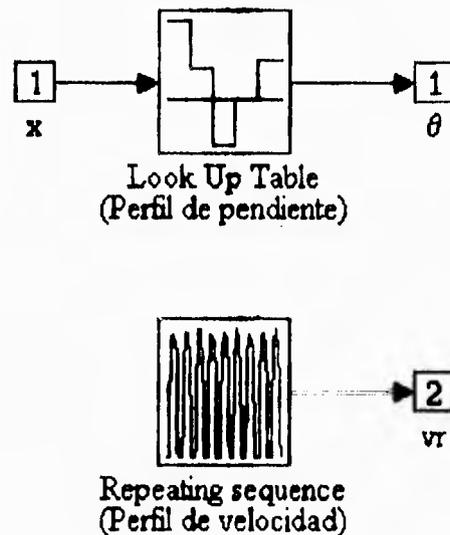


Fig 3.44 Implantación del bloque *Generador de ciclos de conducción*

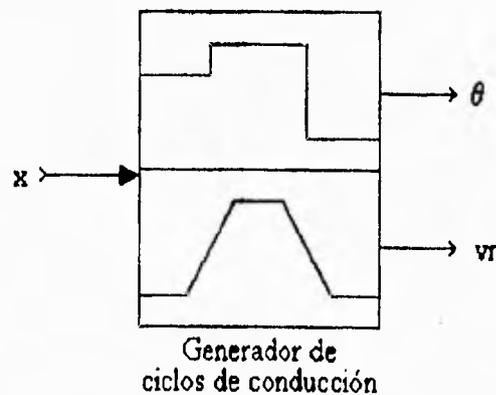


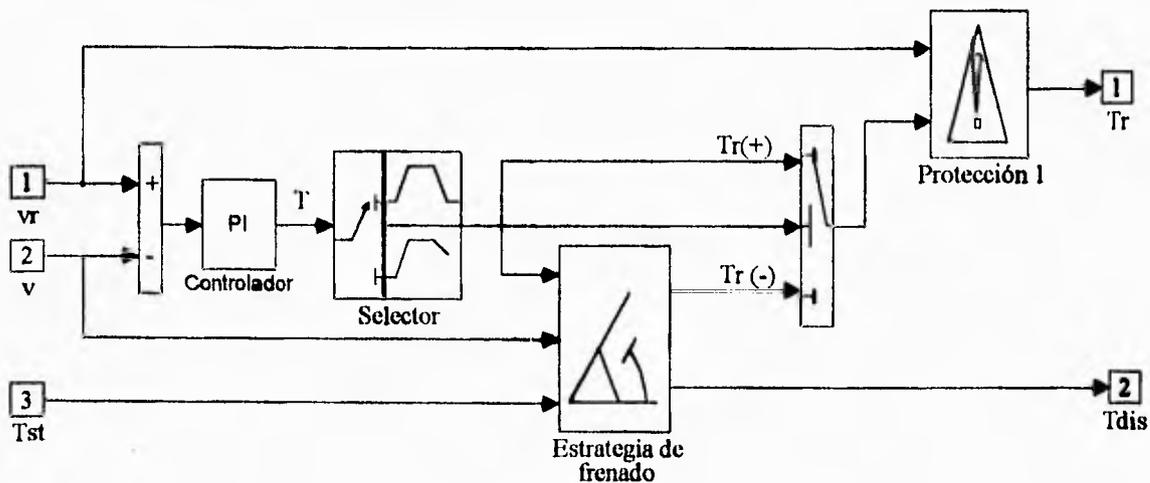
Fig 3.45 Máscara del bloque *Generador de ciclos de conducción*

### 3.6 Piloto

Este bloque emula el comportamiento del conductor en minibús, su función es la de decidir como operar al vehículo, y debe:

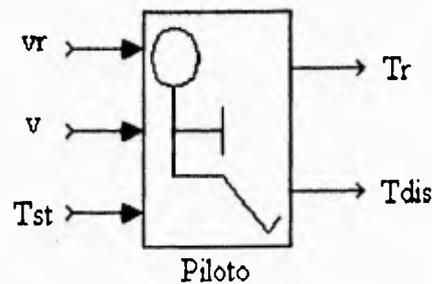
- Comandar los sistemas de tracción y el frenado disipativo para seguir una referencia de velocidad (proveniente del generador de ciclos de conducción) usando para ello la velocidad del vehículo ( $v(t)$ , del bloque *Sistema mecánico*).
- Combinar el frenado regenerativo con el de balatas.
- Evitar que exista un par de frenado de los sistemas de tracción durante los paros totales (en los que el vehículo debe permanecer inmóvil sólo empleando el freno de balatas, si así es requerido, por ejemplo en pendiente de subida o bajada).

La realización de este bloque se muestra a continuación:



**Fig 3.46** Implantación del bloque *Piloto*

La máscara asociada al bloque *piloto* en el modelo, se presenta en la siguiente figura:



**Fig 3.47** Máscara del bloque *Piloto*

Los bloques que integran al bloque piloto tienen las siguiente funciones:

- **Controlador.**- Este bloque opera el error generado por la comparación de la velocidad de referencia ( $v_r(t)$ , del bloque *Generador de ciclos de conducción*) y del vehículo ( $v(t)$ , del bloque *Sistema mecánico*), para efectuar acciones de control de tipo proporcional e integral que forman comandos de par a los sistemas de tracción y frenado del vehículo, tales que consigan llevar al vehículo a la velocidad de referencia demandada.
- **Estrategia de frenado.**- En este bloque se instrumenta la combinación de los frenados regenerativo y disipativo.
- **Selector.**- La función que desempeña este bloque consiste en elegir entre ejecutar un ciclo de conducción de manera continua o ejecutar la etapa de identificación necesaria para la construcción de un ciclo de conducción ideal tipo SAE. Si se elige la ejecución de la identificación, el bloque realiza dos tareas, primero fuerza a cero el par de los sistemas de tracción durante el tiempo  $t_{CO}$  (ver Fig 3.28) para llevar a cabo la **marcha libre**, y segundo, detiene la simulación cuando finaliza la **marcha libre**.
- **Protección 1.**- La función de este bloque es la de asegurar que el par de comando para los sistemas de tracción sea cero cuando el vehículo esté en estado de paro total.

## Controlador

Siguiendo los pasos del esquema de diseño de sistemas de control propuesto en [14], una vez que se ha entendido el proceso (paso 1), la dinámica del vehículo, el comportamiento del sistema de tracción y las referencias a seguir (ciclos de conducción); ya que se han definido que variables se utilizarán en el controlador (paso 2) y el tipo de actuadores del sistema de tracción, se aplican los pasos 4 y 5 que consisten en hacer un modelo lineal del sistema a controlar (paso 4) para con base en él realizar un diseño de prueba simple basado en ideas de PID o de adelanto atraso (paso 5). En este caso la planta a controlar es el vehículo y se considera como salida la velocidad del mismo, y como entrada el par de comando a los sistemas de tracción y al frenado disipativo.

Al simular al vehículo bajo escalones del par de comando mencionado se observó que la respuesta del vehículo se asemeja a la de un sistema lineal de primer orden, aunque con distintas ganancias y constantes de tiempo para diferentes magnitudes del escalón de entrada, así pues, se propuso como modelo lineal del vehículo un sistema de primer orden en el que la ganancia y la constante del modelo lineal se obtienen a partir de una condición dada de operación que queda determinada por un escalón de par de entrada de magnitud tal, que al llegar la velocidad del vehículo al estado estacionario se tenga la velocidad nominal o crucero del vehículo (40 km/h). Con este valor de ganancia y constante de tiempo, el modelo lineal propuesto del vehículo es:

$$\frac{v(s)}{T(s)} = \frac{0.12}{190s + 1} \quad (3.39)$$

La estructura de controlador PI que se implantó en el controlador se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{T(s)}{E(s)} = P + \frac{I}{s} \quad (3.40)$$

donde:

$T(s)$  = acción de control, par de comando para los sistemas de tracción y el frenado disipativo

$E(s)$  = error entre la velocidad de referencia y la desarrollada por el vehículo

$P$  = ponderación de la acción proporcional

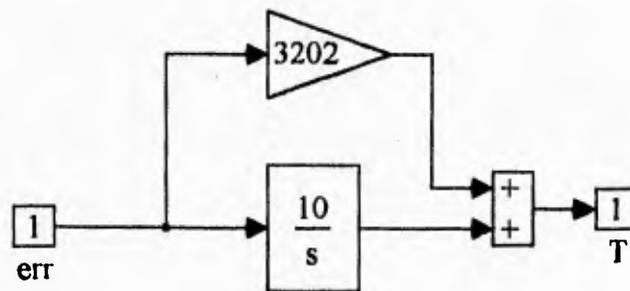
$I$  = ponderación de la acción integrativa

Los parámetros del PI se eligen de tal manera que se logre disponer de un sistema en lazo cerrado con un ancho de banda lo suficientemente grande para permitir seguir perfiles de velocidad, con aceleraciones y frenados bruscos. Esto es, un sistema con una capacidad de respuesta rápida a cambios rápidos en la señal de referencia o comando. Se consideraron como valores de aceleraciones y frenados bruscos aquellos con magnitudes en valor absoluto de  $5 \text{ m/s}^2$ . Cabe mencionar que un frenado con dicha magnitud de desaceleración se considera un frenado de emergencia [15]. El ancho de banda conseguido es de aproximadamente  $\omega_n = 1.44 \text{ [rad/s]}$ . Los valores del controlador que se obtuvieron para lograr dicho ancho de banda son:

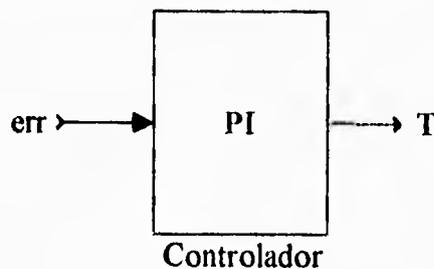
$$P = 3202$$

$$I = 10$$

El sexto paso en el esquema de diseño de sistemas de control consiste en probar el controlador propuesto con la planta real (en este caso con el modelo no lineal completo del vehículo) y ajustarlo en caso necesario. lo que no fue el caso para el controlador del minibús, pues como se verá en el capítulo 4, se obtuvieron buenos resultados con el controlador propuesto. La implantación del controlador así como su máscara asociada se muestran en las siguientes dos figuras:



**Fig 3.48** Implantación del *controlador*



**Fig 3.49** Máscara del *controlador*

### Selector

El bloque *Selector* permite que se identifique la velocidad final en la etapa de marcha libre ( $v_f$ ) de un ciclo ideal SAE o bien una simulación continua. El funcionamiento de este bloque se determina mediante el valor de una constante llamada *sel* que se asigna de manera automática al ejecutarse el programa generador de ciclos de conducción: *ciclos.m*. Si *sel* vale 1, se lleva a cabo la simulación continua; si *sel* vale -1 entonces se realiza la identificación de  $v_f$ . Cuando se establece la opción de simulación continua, el par de salida del bloque *selector* es igual al par de entrada, en cambio, cuando se efectúa la identificación, se realizan dos tareas: primero, el par de salida se fuerza a cero en el inicio de la marcha libre, lo que ocurre en un tiempo  $t_a+t_{cr}$ ; la segunda tarea consiste en parar la simulación al final de la marcha libre (en el tiempo  $t_a+t_{cr}+t_{co}$ ). En la Fig 3.50 se muestra la implantación del bloque *selector* y en la Fig 3.51 se muestra su máscara asociada.

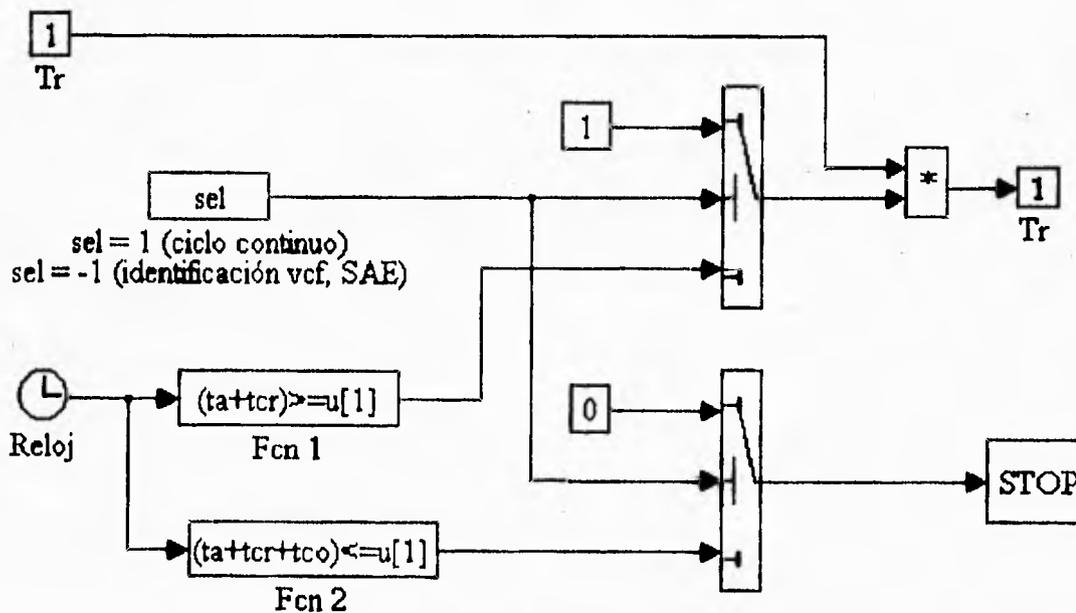
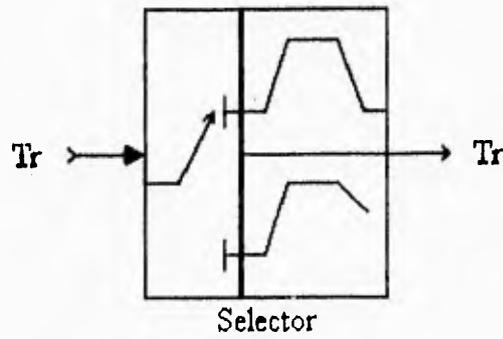


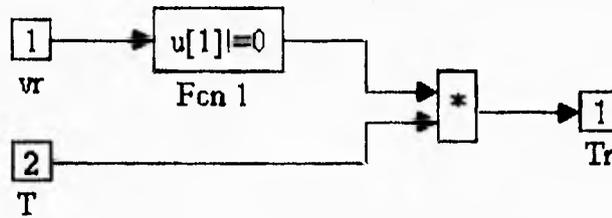
Fig 3.50 Bloque *Selector*



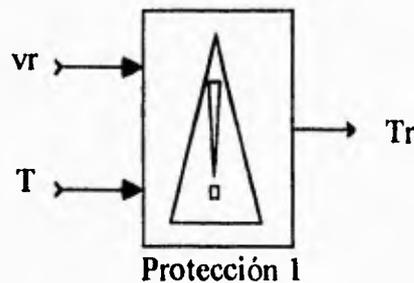
**Fig 3.51** Máscara del bloque *Selector*

**Protección 1**

El bloque *Piloto* dispone de un bloque de protección llamado *Protección 1* dedicado a sujetar en cero el valor del par de referencia del sistema de tracción cuando el vehículo se encuentre en una etapa de paro total. Su implantación y máscara se presentan en las siguientes figuras:



**Fig 3.52** Implantación del bloque *Protección 1*



**Fig 3.53** Máscara del bloque *Protección 1*

### **Estrategia de frenado**

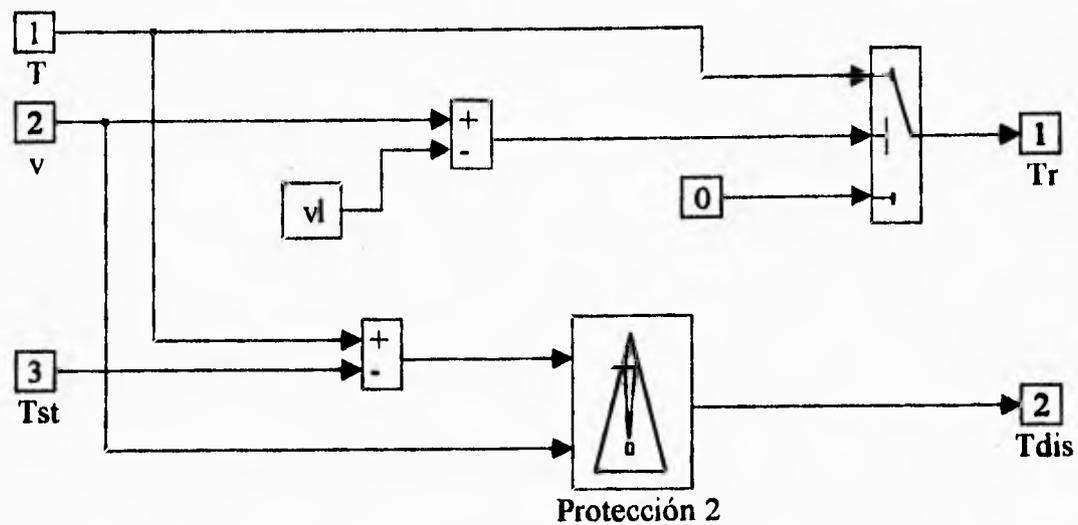
Una de las partes fundamentales de este trabajo recae en el análisis de una estrategia de frenado. Se define como estrategia de frenado a la instrumentación de uno o más criterios bajo los cuales deben combinarse el frenado regenerativo de los sistemas de tracción (en este caso sólo del sistema eléctrico) y el disipativo de balatas.

En el diseño de la estrategia de frenado para un vehículo eléctrico, es importante considerar las limitaciones de los elementos que intervienen durante el frenado regenerativo, por ejemplo, en el estudio realizado por F. Wyczalek y T. Wang [15], se afirma que niveles de recarga mayores de 12 kW en un banco de baterías de 280 V de NiCd, reducen en gran medida su vida útil.

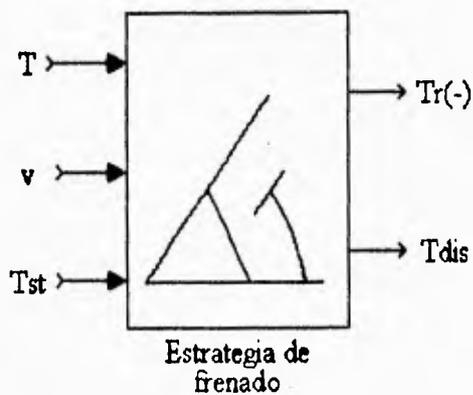
No existe gran información sobre la manera en que se combinan los frenados regenerativo y disipativo en los vehículos eléctricos que ya existen. Según Ayres McKenna [16], se recomienda frenar regenerativamente un móvil con una velocidad crucero de 30 mph hasta la mitad de dicha velocidad (15 mph o aproximadamente 7 m/s), valor a partir de la cual según dicha referencia ya no es práctico mantener los requerimientos de regeneración.

Lo anterior se basa en el hecho de que al ser la energía cinética una función cuadrada de la velocidad, al reducir la velocidad un vehículo apenas a la mitad, la energía cinética que puede transformarse en energía electroquímica es de tres cuartas partes la energía total que tiene el vehículo en el momento de frenar, cantidad que es una buena fracción del total de energía disponible.

Tomando en consideración que la velocidad crucero del minibús es cercana a las 30 mph (48.3 km/h), se consideró adecuado emplear la estrategia propuesta en [16] con el mismo valor límite de frenado regenerativo (25 km/h). A continuación se presenta la implantación de esta estrategia en computadora digital.

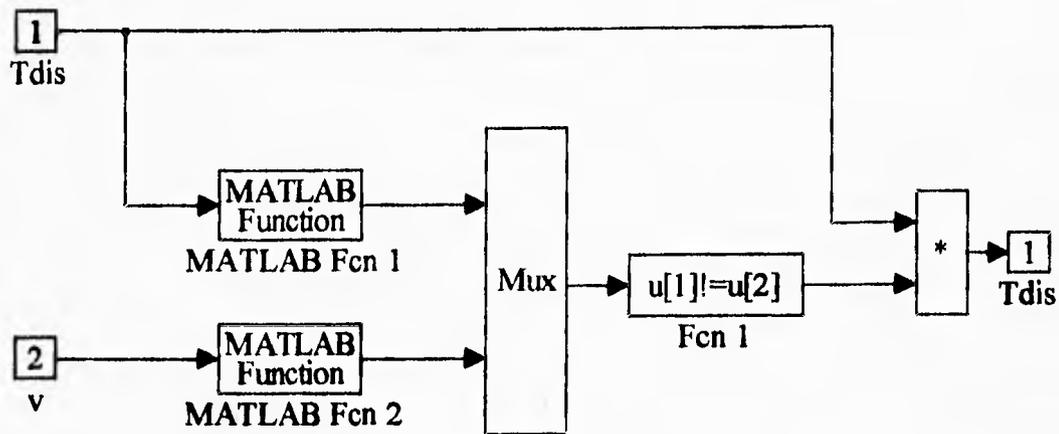


**Fig 3.54** Estrategia de frenado recomendada en [16]

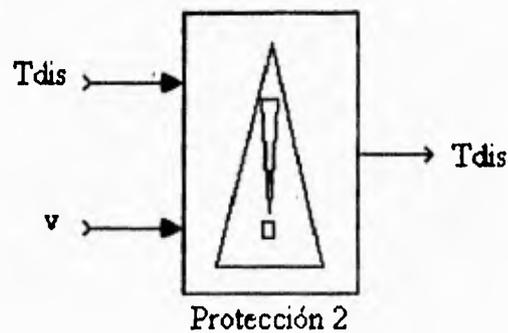


**Fig 3.55** Máscara de la estrategia de frenado recomendada en [16]

Adicionalmente, el bloque *Estrategia de frenado*, como se observa en la Fig 3.54, incluye un bloque llamado *Protección 2*. Este bloque cumple la función de asegurar que el par disipativo siempre tiene sentido contrario al de la velocidad. Su implantación se muestra en la siguiente figura:



**Fig 3.56** Implantación del bloque *Protección 2*

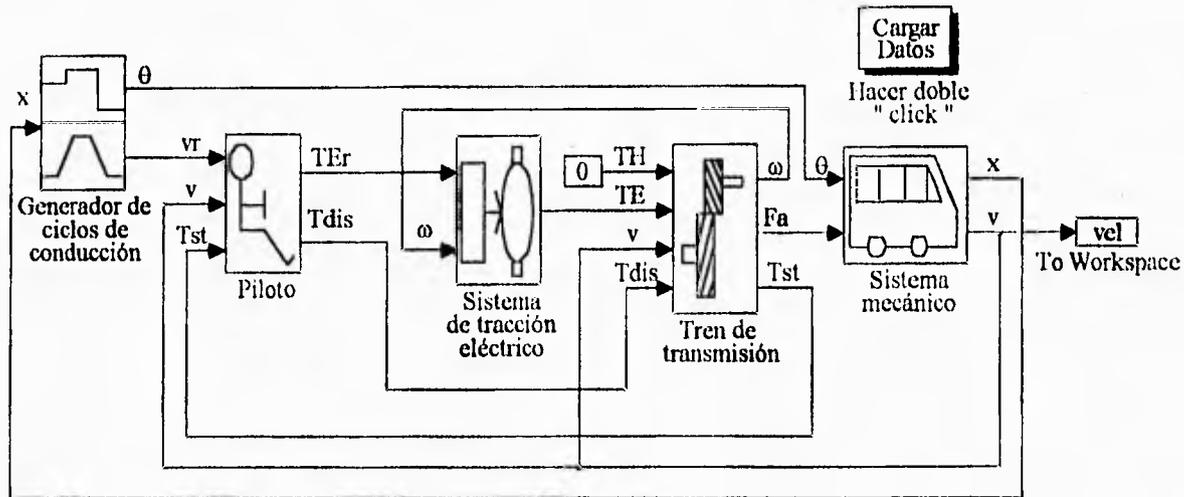


**Fig 3.57** Máscara del bloque *Protección 2*

La función de MATLAB implantada en los bloques *MATLAB Fcn 1* y *MATLAB Fcn 2* es la función signo (*sign*).

### 3.7 Integración del simulador

La integración del simulador con base en los bloques ya descritos, es como se muestra en la Fig 3.58.



**Fig 3.58** Implantación del simulador

El bloque *To workspace* es parte necesaria del simulador, ya que cuando se elige realizar simulaciones bajo un ciclo de conducción ideal tipo SAE, la etapa previa necesaria para su construcción requiere del cálculo del valor de la velocidad final de marcha libre, por lo que es imprescindible para tal acción contar con este bloque, el cual genera un vector de datos de nombre *vel* y que obviamente contiene los datos de la velocidad del vehículo. Para dicha etapa de identificación, el último valor de *vel* corresponde al valor final de la velocidad final de marcha libre. Este vector *vel* es usado por el programa *ciclos.m* para completar un ciclo SAE.

La ejecución del bloque *Cargar Datos* asigna los valores de los parámetros del modelo que se encuentran establecidos en un archivo especial llamado archivo de parámetros, y los almacena en el espacio de trabajo de MATLAB.

En las dos figuras siguientes, se muestra el bloque *Cargar Datos* y la ventana asociada al mismo (esta se abre seleccionando al bloque y pulsando la opción *Mask* en el menú *Options* de la barra de menús del simulador) en donde se indica el nombre del archivo de parámetros, que en el caso del minibus se decidió llamar *autodat.m*.



Hacer doble click

Fig 3.59 Bloque *Cargar Datos*

subsystems

Block name: Hacer doble "click"  
Block type: Subsystem

Mask Block Definitions

New block type:

Dialog strings separated by | :  
eval('autodat')

Initialization commands:

Drawing commands:  
Cargar\r\nDatos

Help string:

OK  
Cancel  
Help

Fig 3.60 Ventana del bloque *cargar datos* con **autodat.m** como ejemplo del archivo de parámetros



% - - - - -

**% Parámetros del sistema de tracción eléctrico**

% - - - - -

**% Parámetros del motor de CD equivalente**

% .....

**% Inercia del rotor del motor de CD (kg m<sup>2</sup>)**

**Je=0.055**

**% Coeficiente de fricción viscosa del rotor del motor de CD (N m s)**

**Be=0**

**% Constante de construcción del motor**

**Ke=1.226**

**% Resistencia de armadura (Ohms)**

**Ra=0.22**

**% Valor del reductor mecánico del motor eléctrico (Re : 1)**

**Re=3.72**

**% Parámetros de los controladores y del actuador**

% .....

**% Corriente de armadura máxima (A)**

**iamax=150**

**% Corriente de armadura mínima (A)**

**iamin=-150**

**% Ciclo de trabajo máximo**

**DH=1**

**% Ciclo de trabajo mínimo**

**DL=0**

**% Flujo magnético nominal (Wb)**

**FN=1**

**% Velocidad angular nominal del motor de CD (rad/s)**

**wN=225**

**% Parámetros del banco de baterías**

**% .....**

**% Número de bancos básicos conectados en paralelo**

**np=2**

**% Número de celdas básicas conectadas en serie**

**ns=144**

**% Carga máxima del banco total de baterías (Ah)**

**Qmax=200**

**% Carga inicial del banco total de baterías (condiciones iniciales) (Ah)**

**Qi=0**

**% Constantes del modelo del banco de baterías**

**C1=2.2**

**C2=0.4167**

**C3=0.00198**

**C4=0.00325**

**% -----**

**% Parámetros del piloto**

**% -----**

**% Ponderación del factor proporcional del PI**

**P=3202**

**% Ponderación del factor integral del PI**

**I=10**

**% Parámetros de la estrategia de frenado**

**% .....**

**% Velocidad límite de frenado regenerativo eléctrico (m/s)**

**vl= 6.94**

Esta manera de manejar los datos del simulador otorga la facilidad de poder simular cualquier vehículo eléctrico similar, asignando los valores de los parámetros correspondientes al nuevo modelo que se desee estudiar.

### **3.8 Ejecución de las simulaciones**

Los pasos a seguir para poder realizar una simulación son los siguientes:

- 1) Actualizar los valores del archivo de parámetros (en el caso del minibús el archivo **autodat.m**)
- 2) Activar el esquema del simulador, que en este caso tiene el nombre **spe.m** desde MATLAB o SIMULINK
- 3) Cargar los valores de los parámetros del modelo en el espacio de trabajo de MATLAB ejecutando el archivo **autodat.m**. Esto se hace dando dos 'clicks' al bloque *Cargar Datos* que se encuentra en la ventana del simulador



Hacer doble  
click

- 4) Crear el ciclo de conducción bajo el cual se realizará la simulación, para ello se ejecuta el programa **ciclos.m** desde el espacio de trabajo de MATLAB
- 5) Seleccionar los parámetros de la simulación en el menú *Simulation* de la ventana de SIMULINK eligiendo la opción *Parameters*
- 6) Iniciar la simulación seleccionando la opción *Start* del menú *Simulation*
- 7) Si se ejecuta la simulación bajo un ciclo de conducción ideal SAE y se lleva a cabo la etapa de identificación, la simulación se detiene de manera automática una vez que se

**identifica la velocidad final de marcha libre (necesaria para generar el perfil de velocidad tipo SAE). Una vez finalizada dicha etapa hay que ejecutar los pasos 4 a 6 nuevamente**

- 8) El último paso consiste en visualizar el comportamiento de las variables de interés mediante las formas indicadas en el manual de SIMULINK**

## **PRUEBAS Y RESULTADOS**

Las pruebas en este trabajo se dividen en dos partes, la primera consiste en evaluar el simulador del minibús utilizando datos experimentales adquiridos en pruebas de campo en una camioneta eléctrica (G-Van) construida por la compañía General Motors con la participación de EPRI, Vehema International, Magna Int. Company, Chloride EV Systems y General Motors Corporation con soporte de Southern Calif. Edison Company [17]. Esta camioneta está siendo utilizada por el Departamento de Uso de Energía del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). La evaluación consiste en hacer funcionar el simulador con valores de parámetros representativos de la G-Van (peso, características del motor, baterías, etc) bajo condiciones similares de operación (perfil de velocidad y pendiente) y comparar el comportamiento del voltaje y corriente en baterías del simulador con los adquiridos experimentalmente. Esta evaluación permitirá conocer el nivel de confianza con el que se puede aplicar esta primera versión del simulador al minibús de la UNAM.

La segunda parte de las pruebas consiste en caracterizar el frenado regenerativo eléctrico del minibús de la UNAM en función de la cantidad de energía que recupera el vehículo bajo diferentes niveles de frenado (se define por nivel de frenado un valor de desaceleración constante), y analizar el efecto del frenado regenerativo en la autonomía del minibús de la UNAM para un ciclo de conducción ideal SAE tipo B.

### ***4.1 Evaluación del simulador con datos experimentales de una camioneta eléctrica G-Van***

Las características de la camioneta G-Van fueron proporcionadas por el IIE de manera no oficial, por lo que el dicha institución no se hace responsable por la información presentada en este trabajo ni por el uso que de ella pudiera hacerse. A continuación se muestran los datos mencionados:

**1. Datos del motor:**

tensión nominal	216 V
corriente de armadura máxima	250 A (15 min @ 2500 rpm)
velocidad nominal	2500 rpm
velocidad máxima	6000 rpm @ 50 Nm
par máximo	330 Nm @ 260 rpm
corriente de campo máxima	15 A @ 65 V
Eficiencia nominal del motor	93 %
Potencia nominal	26.1 kW (35 HP)
Potencia intermitente	54 kW (15 min)

**2. Relación de reducción del diferencial:** 4.71:1

**3. Relación de reducción de caja de transmisión:** 1.85:1

**4. Radio efectivo de las ruedas (a 80 psi):** 0.365 m

**5. Velocidad máxima del vehículo:** 92.8 km/h

**6. Peso del vehículo (sin pasajeros):** 3 545 kg

**7. Peso del conductor:** 70 kg

**8. Coeficiente aerodinámico:** 0.34

**9. Coeficiente de resistencia al rodamiento:** 0.009

**10. Área frontal:** 4.165 m<sup>2</sup>

**11. Tipo de batería:** plomo-ácido

**12. Composición del banco de baterías:** 36 baterías de 6V  
conectadas en serie

**13. Capacidad nominal del banco de baterías:** 186 Ah @ 3 horas

**14. Tensión nominal en baterías:** 233 V (totalmente cargadas)

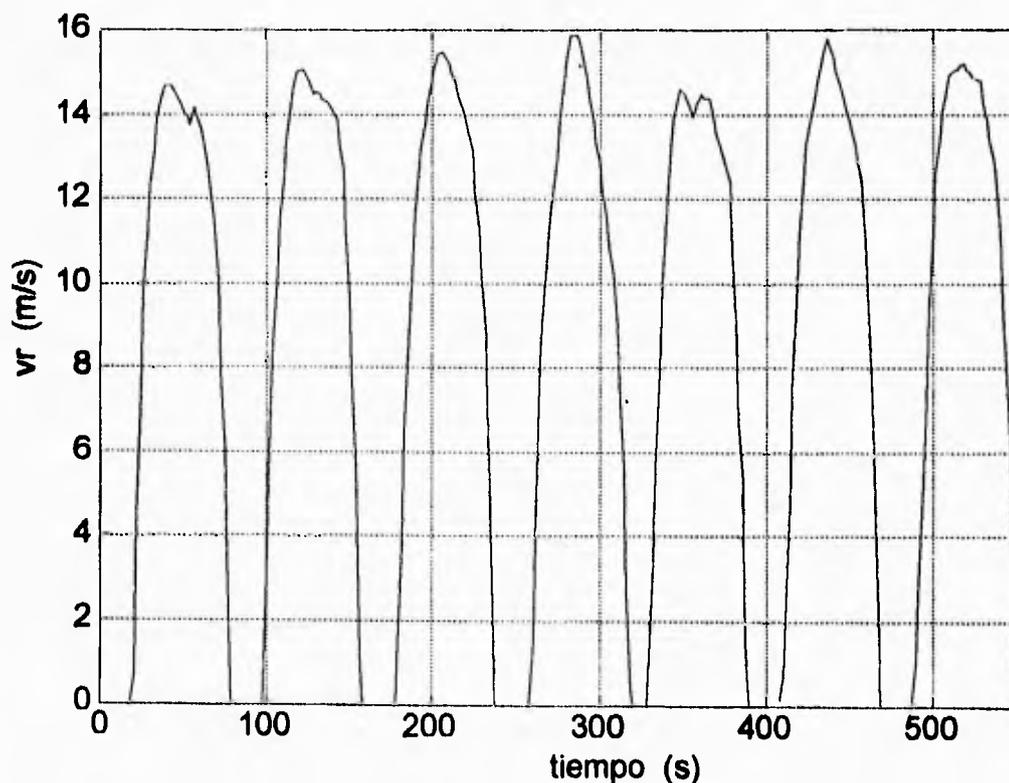
15. Voltaje en baterías en circuito abierto al comienzo de las pruebas:

219 V

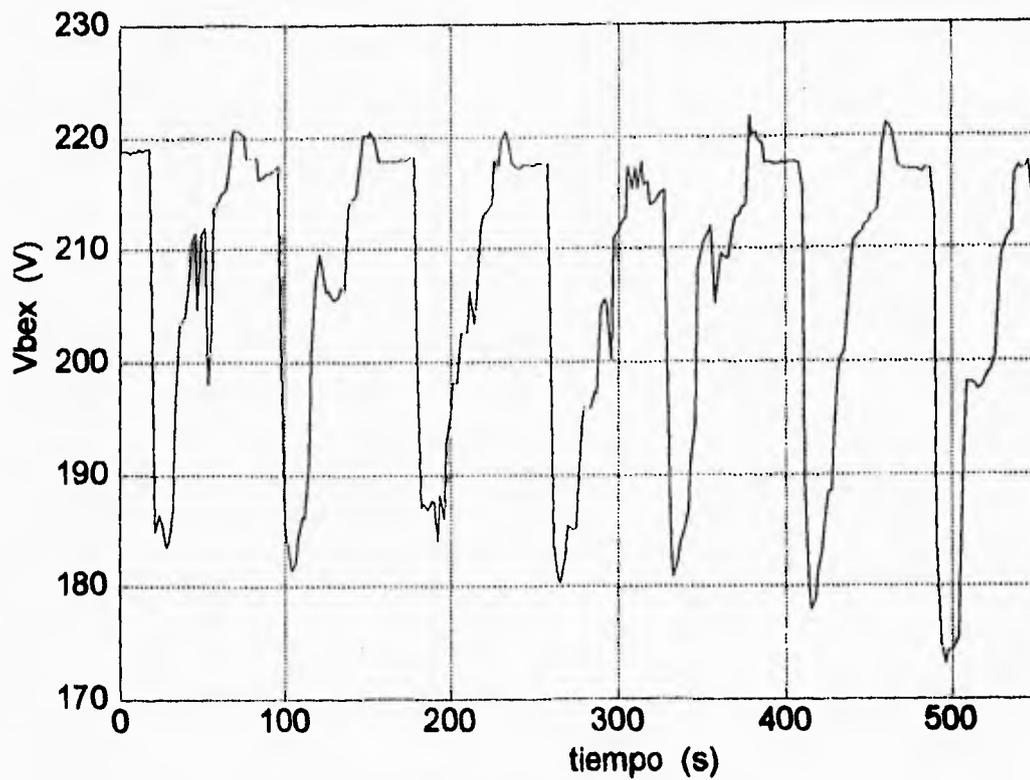
Se consideró que la densidad del aire en la Ciudad de México es de  $0.928 \text{ kg/m}^3$ . No fue posible obtener la información de la inercia del rotor ni del coeficiente de fricción viscosa del mismo. Como no se contaba con el dato del valor de corriente máxima del controlador del motor, se propuso un valor límite alto, de 350 A.

### Datos experimentales de pruebas de campo

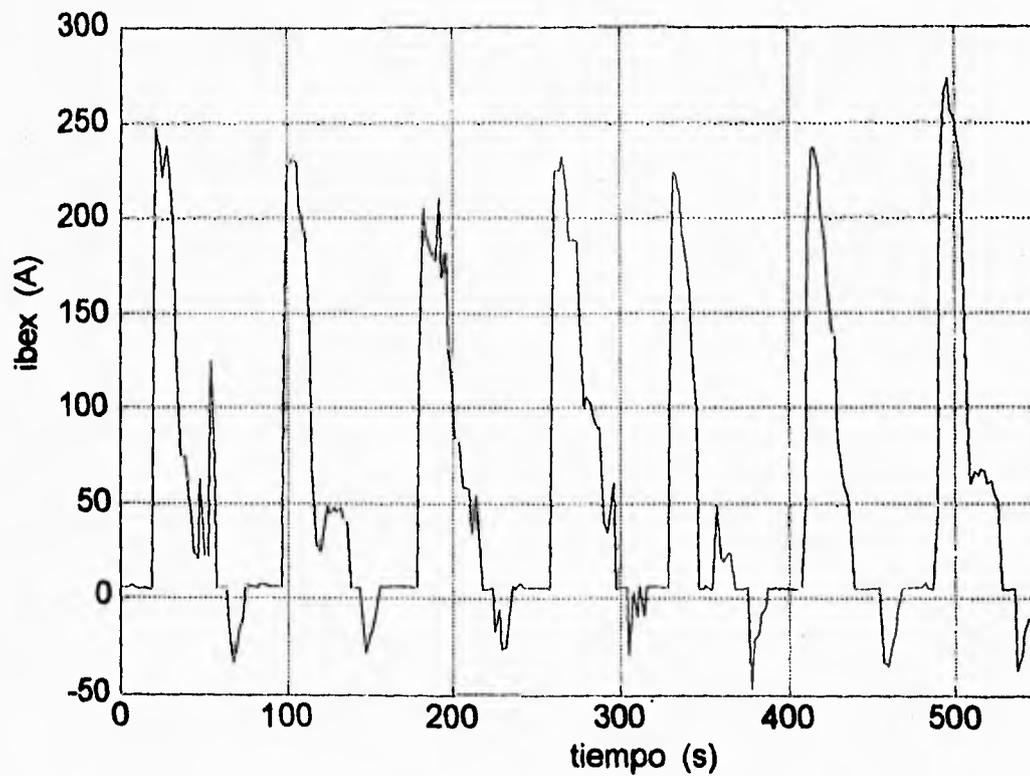
En las pruebas de campo efectuadas a la G-Van se operó a la camioneta bajo el patrón de conducción SAE tipo C. La adquisición de los datos se hizo con un tiempo de muestreo de 2 segundos. Dichos datos se almacenaron en caracteres ASCII. Los datos adquiridos durante las pruebas son velocidad ( $v_r$ ), corriente en baterías ( $i_{bex}$ ) y tensión en baterías ( $V_{bex}$ ) y se presentan a continuación:



**Fig 4.1** Perfil de velocidad experimental (ciclos de conducción SAE tipo C)



**Fig 4.2** Voltaje en las baterías (datos experimentales)



**Fig 4.3** Corriente en las baterías (datos experimentales)

Los datos de velocidad se obtuvieron de la derivación aproximada de la posición del vehículo, la cual se obtuvo de un contador discreto. La corriente en baterías se sensó mediante una resistencia muy pequeña y precisa (resistencia *shunt*), mientras que para la medición del voltaje en baterías se usó simplemente un divisor de tensión.

Para la simulación del modelo de la G-Van se propuso utilizar los mismos valores de los parámetros del controlador calculados para el minibús UNAM y ajustarlos a partir de los datos de la simulación si fuese necesario.

Con base en los datos anteriores, se asignaron y/o calcularon los valores de todos los parámetros que involucra el simulador, generándose el archivo de datos asociado al modelo de la camioneta G-Van (en este archivo el valor del parámetro  $K_e$  se ajustó en función de la simulación). A este archivo se le nombró como **gvandat.m** y se muestra enseguida (se muestra el valor de  $K_e$  ajustado):

```
% ++++++
%      Valores de los parámetros de la camioneta G-Van
% ++++++
```

```
% -----
% Parámetros del sistema mecánico
% -----
```

```
% Área frontal del vehículo (m2)
A=4.165
% Coeficiente aerodinámico
Cd=0.463
% Densidad del aire (kg/m3)
p=0.928
% Coeficiente de resistencia al rodamiento
ro=0.009
% Masa total del vehículo (kg)
m=3615
```

% -----  
% **Parámetros del tren de transmisión**  
% -----

**% Valor del diferencial (Dif : 1)**  
**Dif=4.71**  
**% Radio de la rueda (m)**  
**r=0.365**

% -----  
% **Parámetros del sistema eléctrico**  
% -----

**% Parámetros del motor de CD**  
% .....

**% Inercia del rotor del motor de CD (kg m<sup>2</sup>)**  
**Je=0**  
**% Coeficiente de fricción viscosa en el motor de CD (N.m.s)**  
**Be=0**  
**% Constante eléctrica del motor**  
**Ke=0.616**  
**% Resistencia de armadura (Ohms)**  
**Ra=0.05**  
**% Valor del reductor mecánico del motor eléctrico (Re : 1)**  
**Re=1.85**

**% Parámetros de los controladores y del actuador**  
% .....

**% Corriente de armadura máxima (A)**  
**iamax=350**  
**% Corriente de armadura mínima (A)**  
**iamin=-350**  
**% Ciclo de trabajo máximo**  
**DH=1**

**% Ciclo de trabajo mínimo**

**DL=0**

**% Flujo magnético nominal (Wb)**

**FN=1**

**% Velocidad angular nominal del motor de CD (rad/s)**

**wN=261**

**% Parámetros del banco de baterías**

**% .....**

**% Carga máxima total del banco de baterías (Ah)**

**Qmax=186**

**% Carga inicial total del banco de baterías (Ah)**

**Qi= 77.28**

**% Constantes del banco de baterías**

**C1=2.2**

**C2=0.4167**

**C3=0.00198**

**C4=0.00325**

**% Número de celdas básicas conectadas en serie**

**ns=108**

**% Número de bancos en paralelo**

**np=2**

**% -----**

**% Parámetros del piloto**

**% -----**

**% Ponderación del factor proporcional del PI**

**P=3202**

**% Ponderación del factor integral del PI**

**I=10**

% Parámetros de la estrategia de frenado

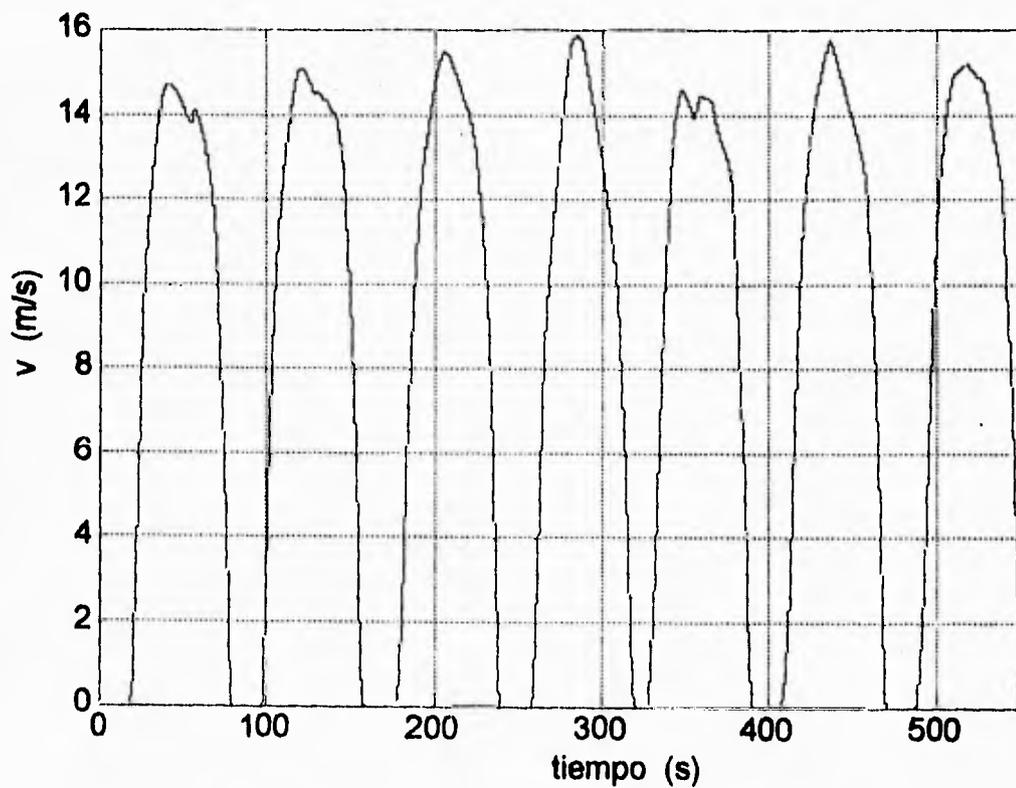
% .....

% Velocidad límite de frenado regenerativo eléctrico (m/s)

$v_l=6.94$

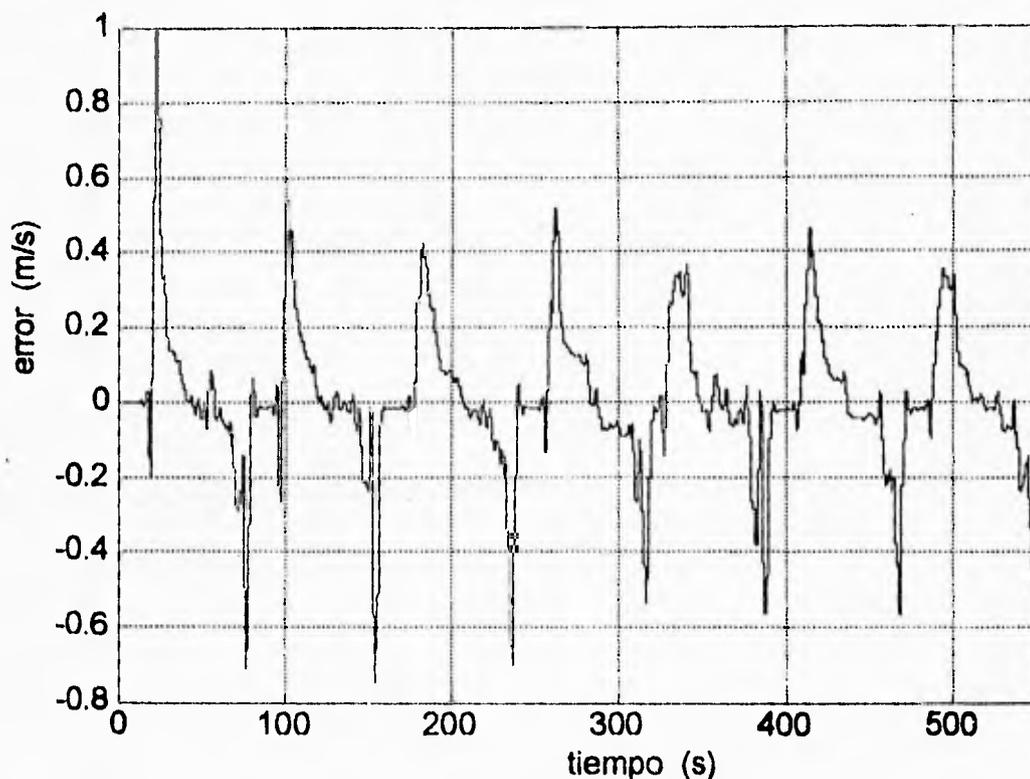
### Simulación de la G-Van

Con los datos anteriores se realizó una simulación para lo cual fue necesario utilizar el programa `ciclos.m` para crear los vectores `vr`, `t`, `teta` y `x` a partir de los datos experimentales almacenados en archivos como caracteres ASCII. En dicha simulación se logró un buen seguimiento de velocidad como lo muestra la gráfica de la Fig 4.4 que corresponde a la velocidad de simulación del modelo de la G-Van y que es muy parecida a la de la Fig 4.1.



**Fig 4.4** Velocidad desarrollada por el simulador de la G-Van

Para evaluar el seguimiento de velocidad se obtiene el error instantáneo entre las velocidades experimental y simulada calculado como:  $v_r(t) - v(t)$ .

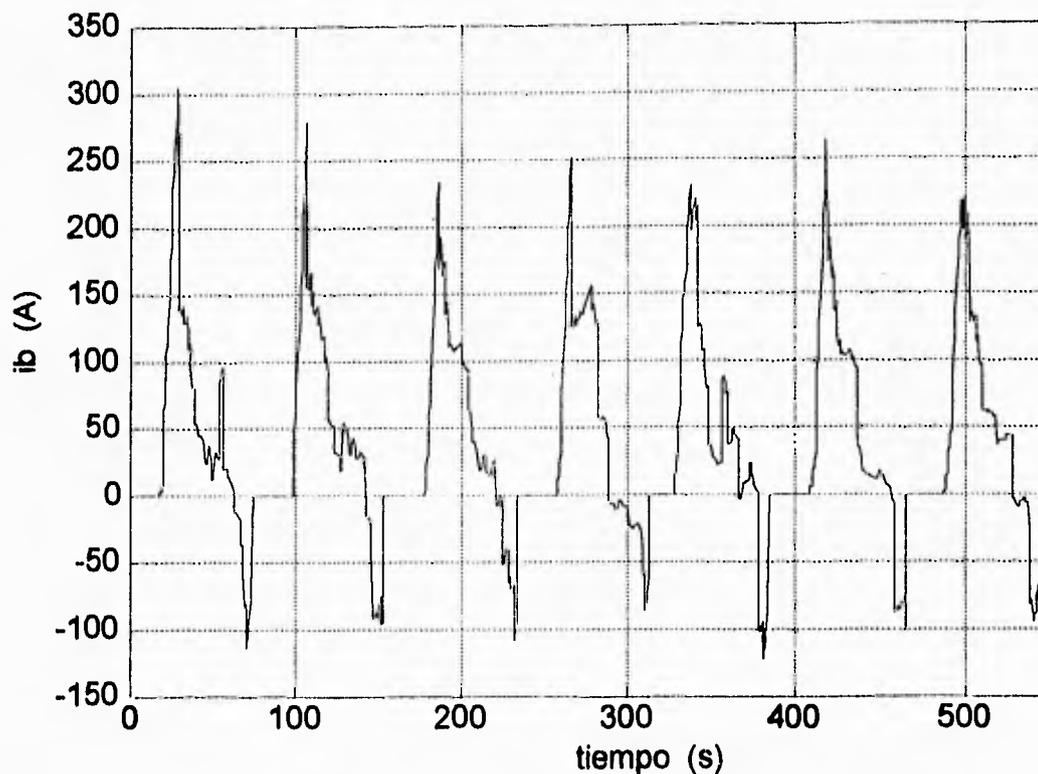


**Fig 4.5** Error entre los datos de velocidad experimentales y los de simulación ( $v_r-v$ )

Como se observa en la Fig 4.5 aun los valores pico del error se mantienen en valores relativamente bajos comparados con el rango de velocidad que desarrolla el vehículo. El valor promedio del valor absoluto del error (error promedio) mostrado en la Fig 4.5 es de sólo 0.12 m/s. De lo anterior puede concluirse que el seguimiento de velocidad en la simulación es razonablemente bueno. Por lo anterior no fue necesario ajustar los parámetros del controlador.

A continuación se presenta la corriente en baterías calculada en la simulación.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA



**Fig 4.6** Corriente en baterías de simulación

Se observa que la corriente de baterías obtenida en la simulación es semejante a la adquirida experimentalmente (ver Fig 4.3) durante la aceleración y que es notoriamente diferente en el frenado, durante el cual la corriente de baterías simulada es aproximadamente el doble que la de los datos experimentales. Esto se debe a que la forma en que frena regenerativamente la camioneta es muy diferente de la que se obtiene aplicando simplemente la recomendación dada en [16].

#### **Combinación de frenado regenerativo y disipativo en la G-Van**

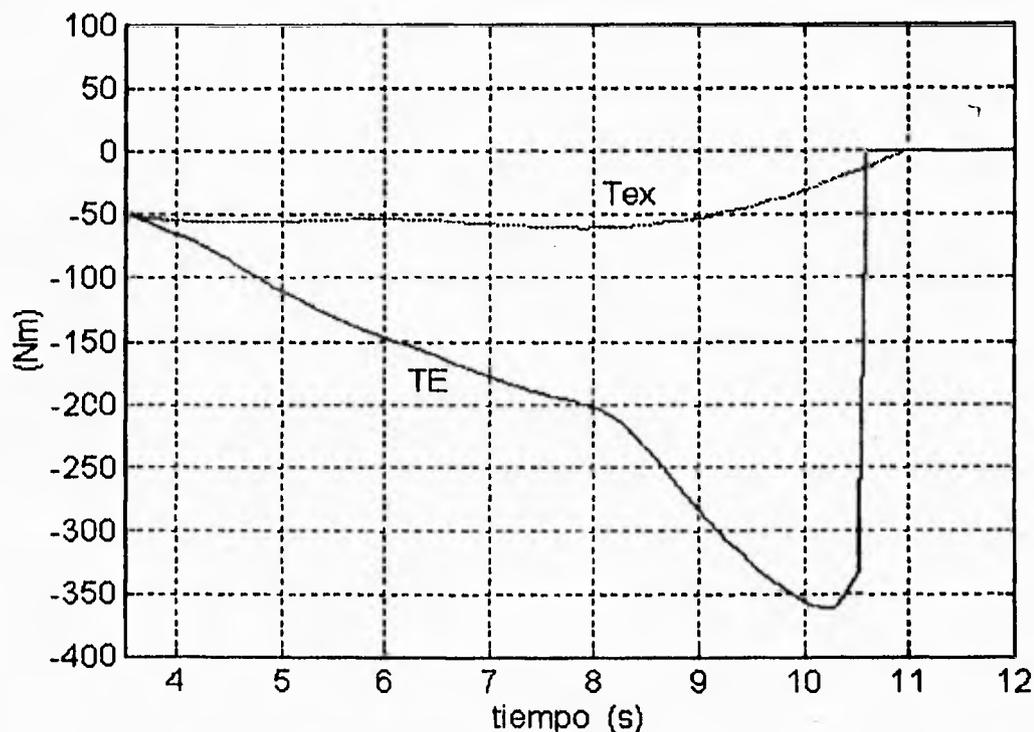
Con la finalidad de encontrar bajo que ley se combinan los sistemas de frenado regenerativo y disipativo en la G-Van para ajustar la estrategia de frenado en el simulador, se compararon los valores del par que entrega el sistema eléctrico ( $T_{ex}(t)$ ), calculado con los datos experimentales, y el par del sistema de tracción eléctrico ( $T_E(t)$ ) obtenido de la simulación, donde ambos pares están referidos a la flecha cardán de la G-Van y donde  $T_{ex}(t)$  se calcula

de manera aproximada (no se considera la eficiencia del actuador, ni la inercia y fricción viscosa del motor) de la siguiente manera:

$$T_{ex}(t) = \frac{V_{bex}(t) i_{bex}(t)}{\omega_{rex}(t)} \quad (4.1)$$

donde  $\omega_{rex}(t)$  es la velocidad angular experimental en el motor eléctrico (que se obtiene del dato de la velocidad del vehículo y con los valores de reducción del diferencial y el radio de las ruedas).

Para poder hacer la comparación de los pares, se les presenta juntos en una misma gráfica como se muestra en la Fig 4.7.



**Fig 4.7** Comparación entre los pares eléctricos experimental y simulado, en la flecha cardán

En la Fig 4.7 se observa que ambos pares llegan a cero casi al mismo tiempo, esto se debe a que efectivamente existe una velocidad límite en la que se deja de usar el frenado regenerativo cuyo valor es prácticamente igual al propuesto en [16] (25 km/h). Se observa también que mientras  $T_E(t)$  alcanza el valor de cero bruscamente,  $T_{ex}(t)$  lo hace de manera suave. Por inspección, se propuso que la forma en la que se debe generar la referencia de par ( $T_r(t)$ ) al sistema eléctrico durante el frenado sea :

$$Tr(t) = \begin{cases} f(v)T(t) & , v(t) > v_l \\ 0 & , v(t) \leq v_l \end{cases} \quad (4.2)$$

donde

$$f(v) = If \left( 1 - \frac{v_l}{v(t)} \right) \quad (4.3)$$

Donde  $If$  es una constante definida como intensidad de frenado regenerativo,  $v_l$  es la velocidad límite hasta donde se deja de usar el frenado regenerativo eléctrico y  $v(t)$  es la velocidad del vehículo.

Una vez obtenida la relación dada por la ec 4.3, se implanta en la estrategia de frenado del simulador de la G-Van. Dicha implantación en computadora así como su máscara asociada en el simulador se muestran en las siguientes figuras:

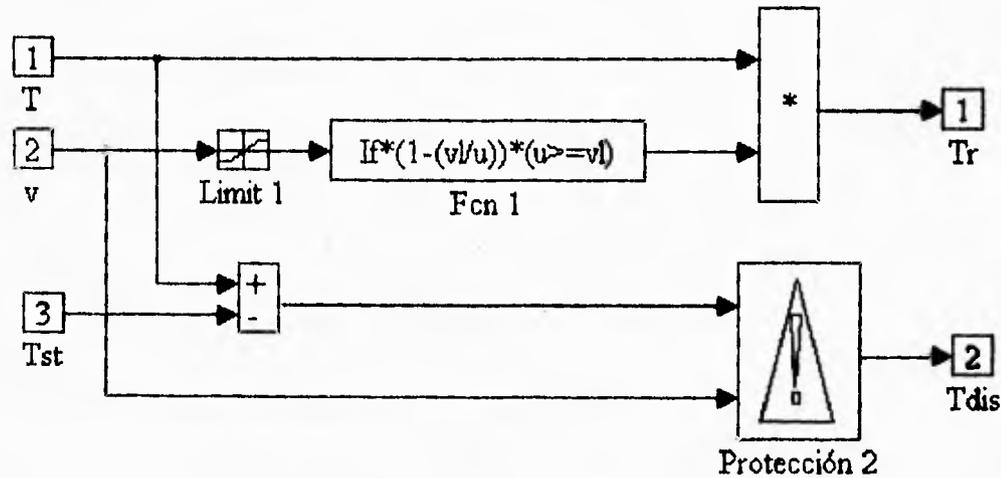


Fig 4.8 Implantación de la estrategia de frenado de la G-Van en el simulador de la G-Van

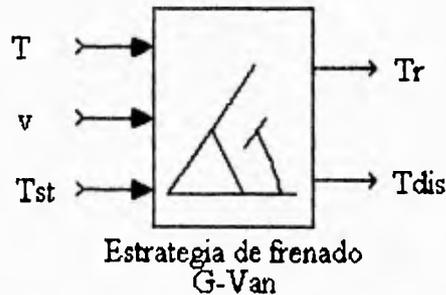


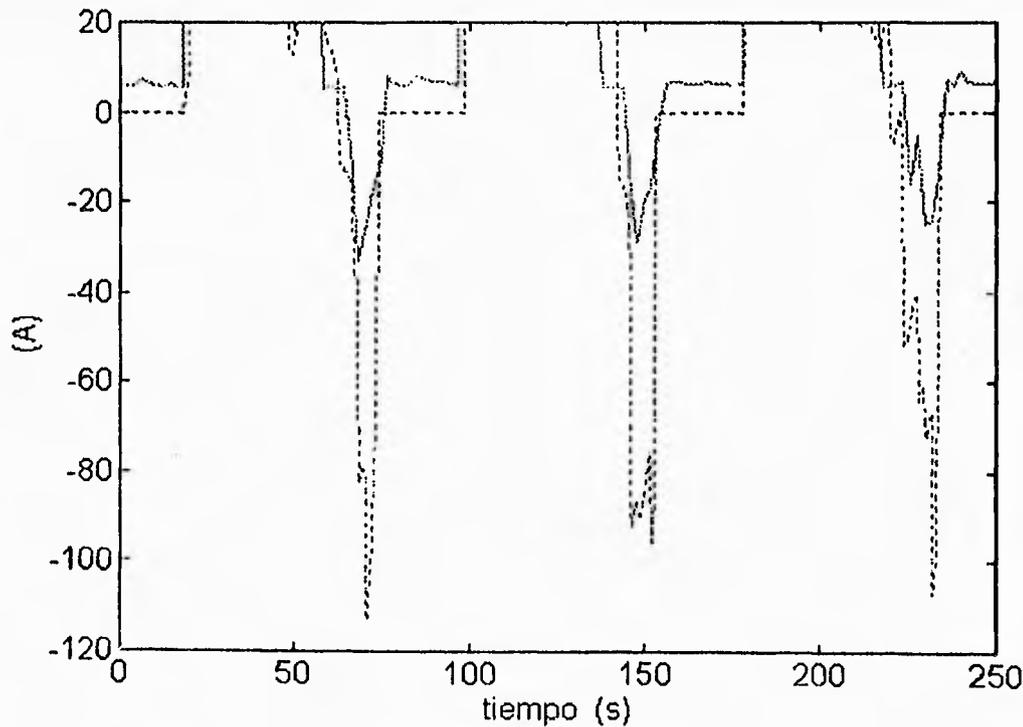
Fig 4.9 Máscara de la estrategia de frenado de la G-Van

También se modifica la asignación de parámetros de la estrategia de frenado en el archivo **gvandat.m** de la siguiente forma:

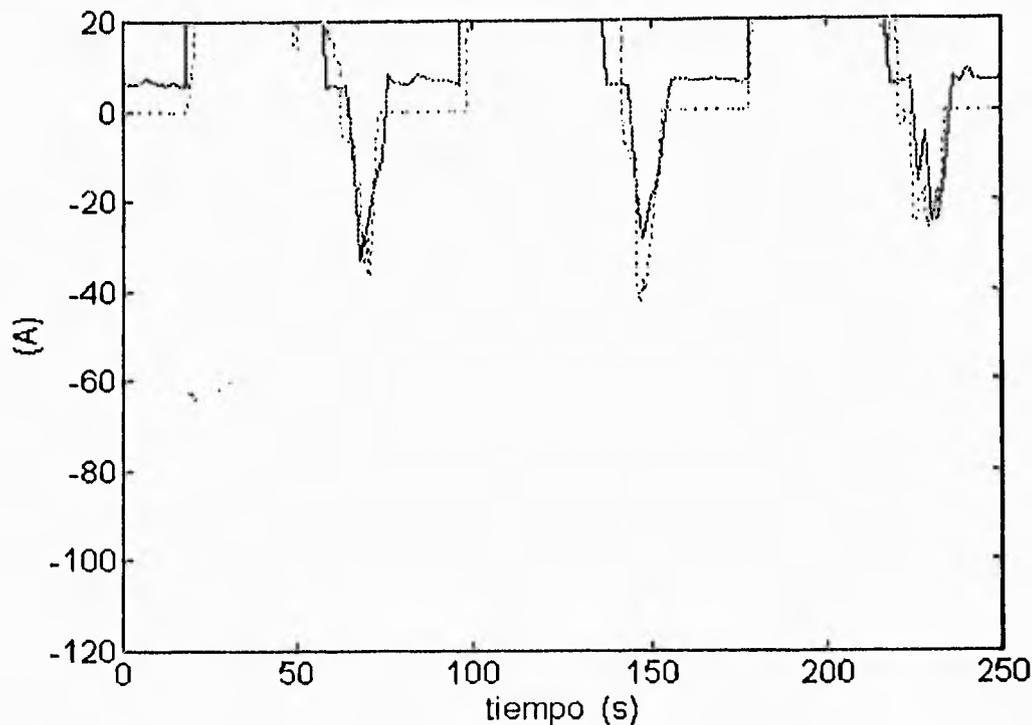
```
% Parámetros de la estrategia de frenado
% .....

% Velocidad límite de frenado regenerativo eléctrico (m/s)
v|=6.94
% Intensidad de frenado regenerativo eléctrico
If=1
```

A continuación, se muestra con más detalle la corriente en las baterías simulada bajo la estrategia de frenado recomendada en [16] (Fig 4.10) y la corriente en las baterías simulada bajo la estrategia de frenado de la G-Van propuesta en la ec 4.3 (Fig 4.11), ambas dibujadas junto con la corriente en las baterías de la G-Van obtenida experimentalmente.



**Fig 4.10**  $i_{bexp}$  (-) vs  $i_b$  (--) bajo la estrategia de frenado de [16]



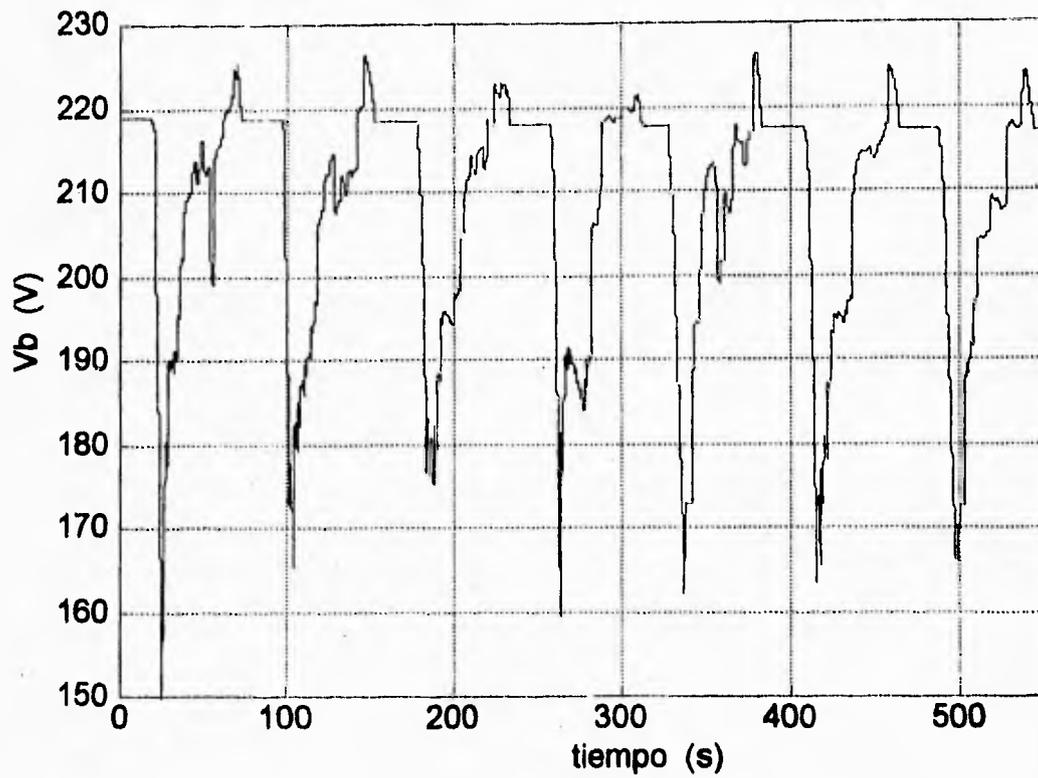
**Fig 4.11**  $i_{bexp}$  (-) vs  $i_b$ (--) bajo la estrategia de frenado de la G-Van

Como se observa en la Fig 4.11, la ec 4.3 representa de manera razonable el comportamiento del frenado regenerativo eléctrico de la G-Van.

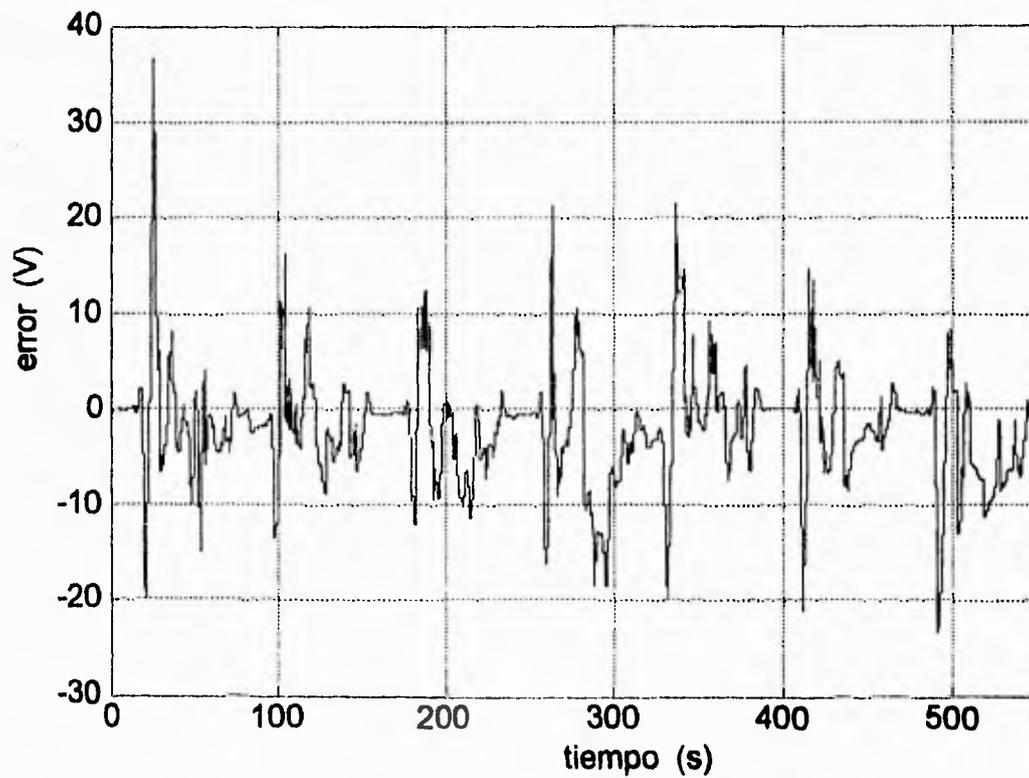
Cabe mencionar que por la forma en que se calcula el par de frenado disipativo en el simulador, el par total de frenado no se altera con la incorporación de la estrategia de frenado de la G-Van, y por ello, el error de velocidad al utilizar el simulador con la estrategia de frenado de la G-Van es el mismo que el de la Fig 4.5.

#### **Comportamiento de las baterías de la G-Van**

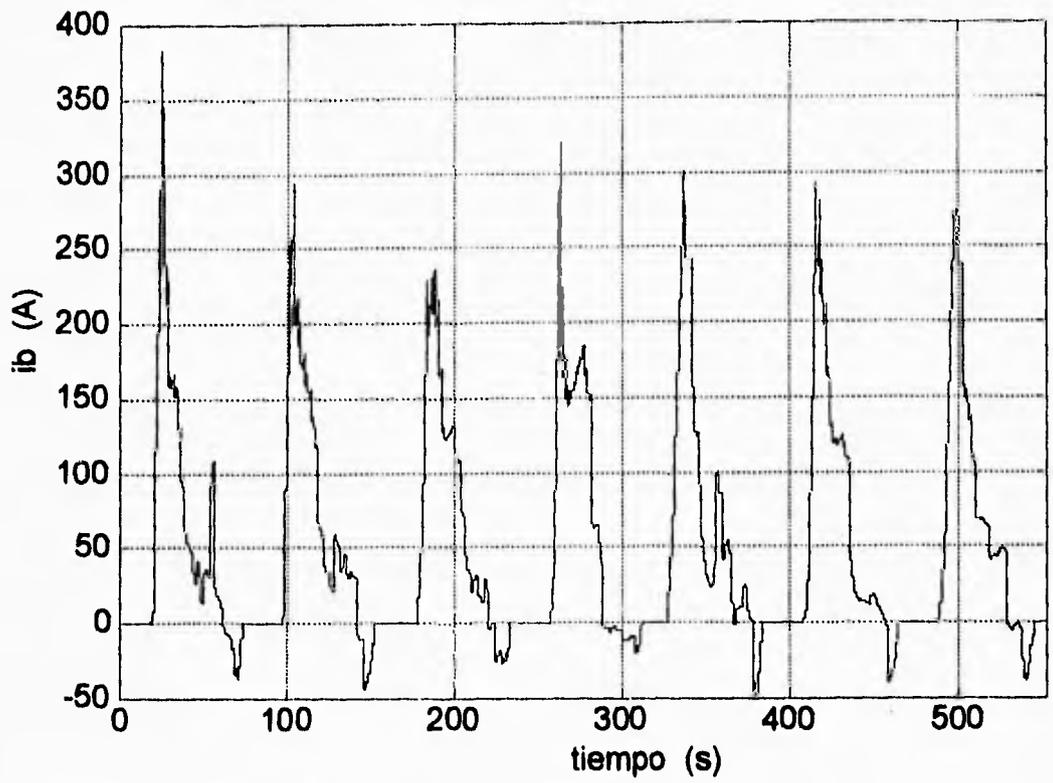
Una vez integrada la estrategia de frenado de la G-Van, se puede comparar el comportamiento de las variables asociadas al banco de baterías de la G-Van respecto a las obtenidas experimentalmente. En las siguientes figuras se muestran las gráficas de voltaje, corriente y descarga en las baterías obtenidas a partir de la simulación, y la descarga de las baterías calculada a partir de la corriente experimental denominada  $Q_{ex}(i_{bex})$ , así como los errores entre los valores experimentales y los simulados:  $V_{bex}(t)-V_b(t)$ ,  $i_{bex}(t)-i_b(t)$  y  $Q_{ex}(i_{bex})-Q(i_b)$ , respectivamente.



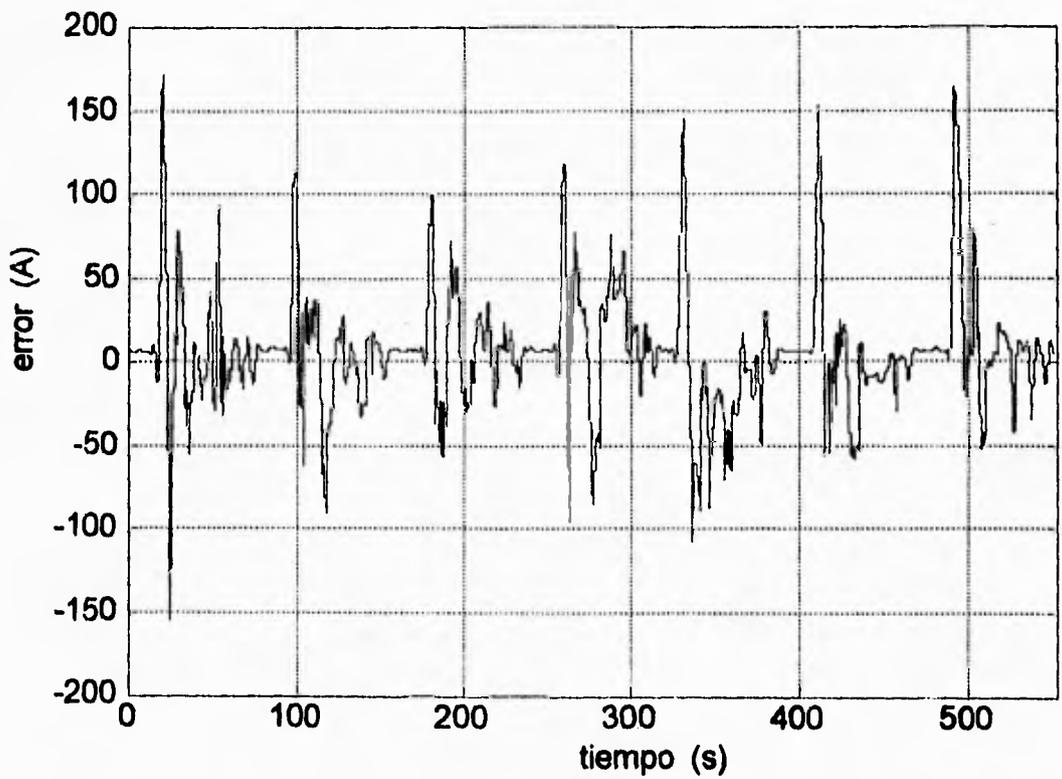
**Fig 4.12** Voltaje en baterías (simulación)



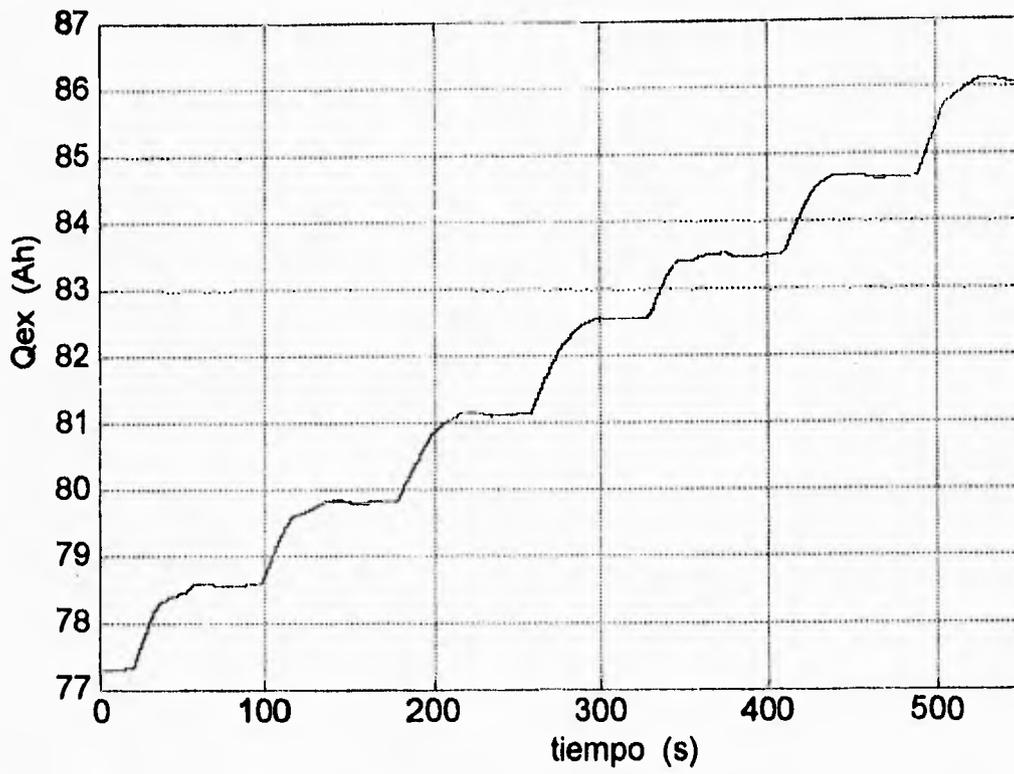
**Fig 4.13** Error de voltaje en el banco de baterías ( $V_{bex}(t) - V_b(t)$ )



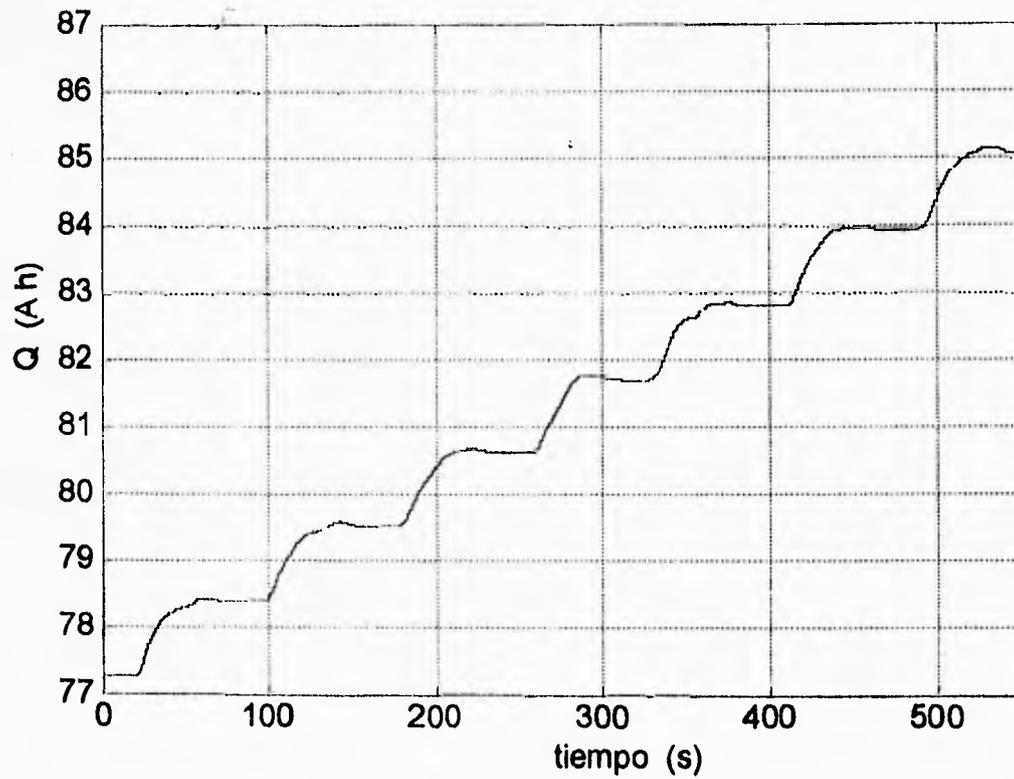
**Fig 4.14** Corriente en baterías (simulación)



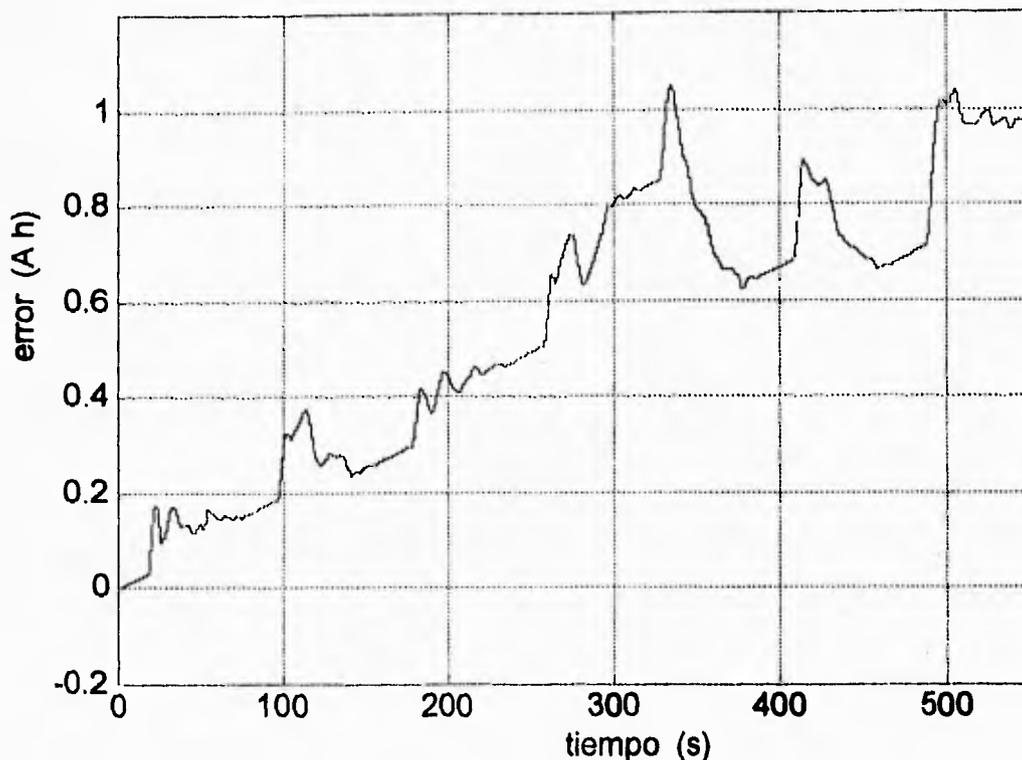
**Fig 4.15** Error de corriente ( $i_{bex}(t) - i_b(t)$ )



**Fig 4.16** Descarga en el banco de baterías (datos experimentales)



**Fig 4.17** Descarga en el banco de baterías (simulación)



**Fig 4.18** Error de descarga en baterías ( $Q_{ex}(t) - Q(t)$ )

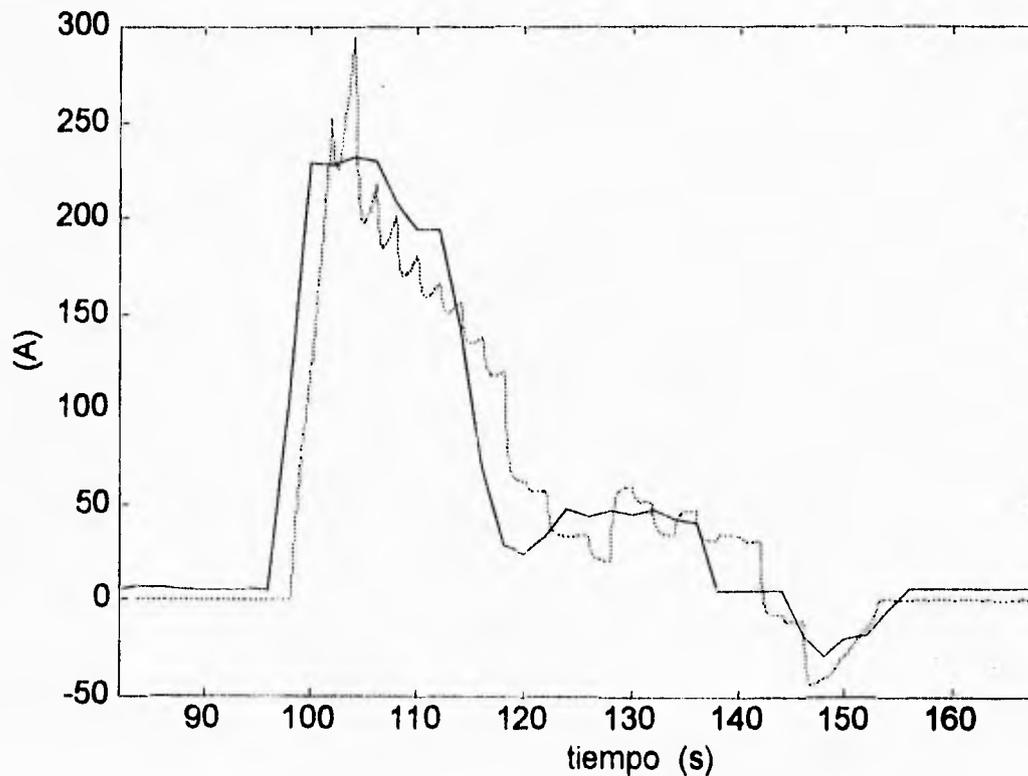
Las magnitudes del error promedio de voltaje y corriente (Figs 4.13 y 4.15) son de 4.16 V y 22.2 A respectivamente. Los valores anteriores son pequeños comparados con los rangos de voltaje y corriente presentes en las Figs. 4.2 y 4.3, por lo que puede afirmarse que en general el desempeño del simulador es adecuado para predecir el comportamiento del sistema de tracción.

En cuanto a la corriente en baterías los datos experimentales muestran una pequeña corriente prácticamente constante cuando el vehículo está parado, mientras que en la simulación la corriente es cero cuando el vehículo se encuentra en el mismo estado. Esta diferencia se debe al consumo de energía del sistema hidráulico de la dirección en la camioneta G-Van.

Si se analizan las curvas de voltaje en baterías se observa que una vez que desaparece la descarga en las baterías, el voltaje se recupera gradualmente y no de manera inmediata como en los datos de la simulación. Esto se debe a la ausencia de dinámica en el modelo de las baterías.

El error de descarga en baterías (Fig 4.18) se incrementa con el tiempo. Si se aproxima este incremento a una recta con un valor de  $2 \times 10^{-3}$  Ah/s de pendiente, el error de descarga después de 3 horas de descarga sería de 21.6 Ah que corresponde a tan sólo el 11% de la carga máxima del banco de baterías.

De las gráficas anteriores también se puede observar que las curvas de corriente y voltaje correspondientes a la simulación son más ruidosas que las señales adquiridas durante las pruebas y que presentan picos de magnitudes relativamente altas con respecto a los datos experimentales, esto se aprecia con más claridad en la Fig 4.19 que muestra en una sola gráfica un acercamiento de las Figs 4.3 y 4.14.

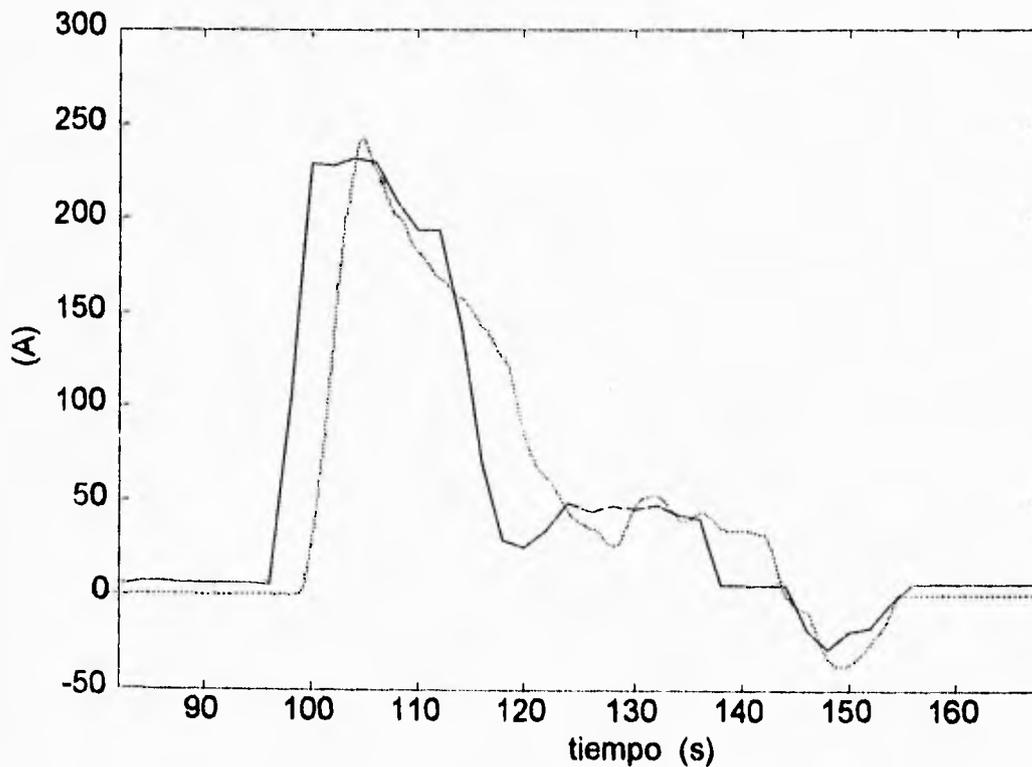


**Fig 4.19**  $i_{bex}$  (-) vs  $i_b$  (--) sin filtro

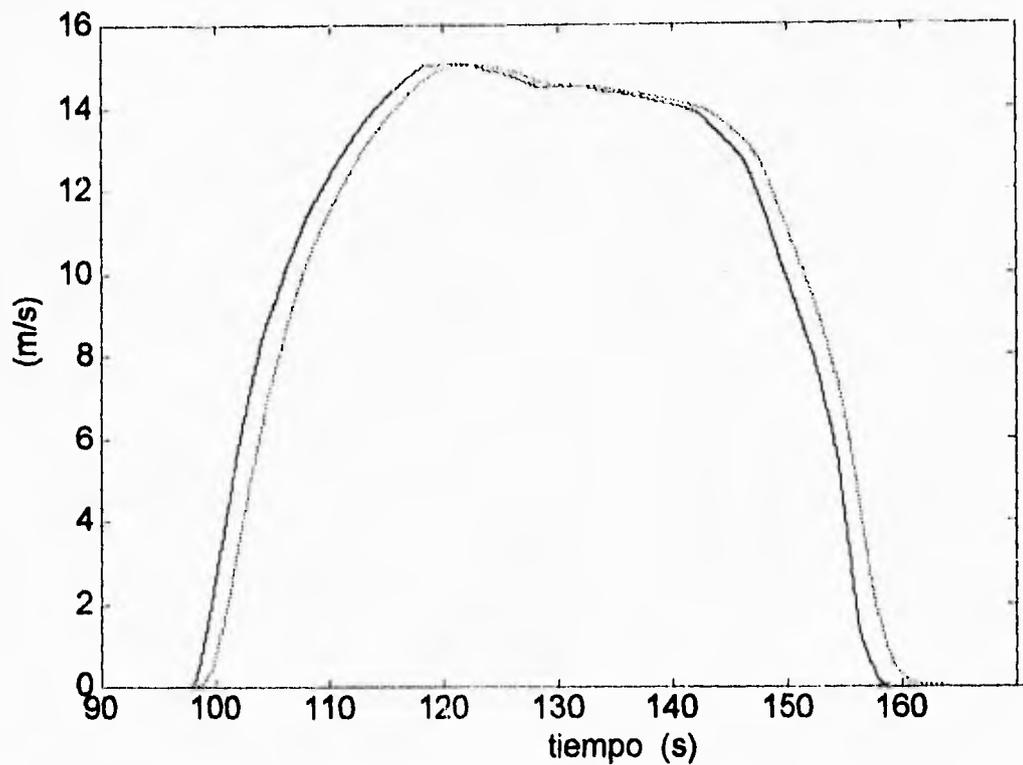
En esta gráfica se nota también que existe un corrimiento o retraso de la corriente simulada con respecto a la medida, esto se debe a que la velocidad también tiene dicho corrimiento producto de que se calcula a partir de la posición. Este corrimiento explica también los picos tan grandes en los errores de corriente y voltaje.

La forma más ruidosa de la corriente simulada ( $i_b(t)$ ) así como la diferencia en magnitud del pico de corriente respecto a la corriente experimental ( $i_{bex}(t)$ ) pueden deberse ya sea a la presencia de ruido en el sensor de posición, a que la velocidad se mide de forma indirecta o a que el tiempo de muestreo es muy grande (de 2 segundos).

Para encontrar el grado de influencia del ruido en el desempeño del simulador, se hizo una nueva simulación en la que se filtra la señal de referencia (el perfil de velocidad experimental) usando un filtro de segundo orden y se compara nuevamente la señal de corriente en el banco de baterías obtenida en el simulador con la corriente experimental así como la velocidad obtenida en el simulador con la velocidad experimental tal como se muestra en las Figs 4.20 y 4.21. Con base en pruebas, se eligió el valor de la frecuencia de corte del filtro de tal manera que eliminara el ruido preservando la información útil de los datos de velocidad experimental, el valor elegido resultó de 1.25 rad/s.



**Fig 4.20**  $i_{bex}(t)$  (-) vs  $i_b(t)$  (--), con filtrado de  $v_r(t)$



**Fig 4.21**  $v_r(t)$  (-) vs  $v(t)$  (--) con filtro

En la Fig 4.20 se observa que la forma de la corriente calculada ( $i_b(t)$ ) cuando se ha filtrado el perfil de velocidad experimental es más parecida a la corriente de origen experimental, lo que indica que dicha corriente corresponde a un perfil de velocidad más suave y que para mejorar el uso del simulador convendría disminuir el tiempo de muestreo, medir directamente la velocidad y/o incluir mejores filtros en la adquisición.

#### **4.2 Caracterización del frenado regenerativo eléctrico en el minibús UNAM**

Una vez determinado que el simulador tiene un desempeño adecuado, se está en posición de utilizarlo con el modelo del minibús para caracterizar el frenado regenerativo eléctrico del mismo. Para ello, se define como *eficiencia de frenado regenerativo* aquella que determina el porcentaje de energía que recupera el banco de baterías del vehículo con respecto a la energía cinética disponible en el momento de comenzar el frenado, y como *consumo de operación por ciclo* el consumo de energía durante un ciclo de conducción. El cálculo de estos dos elementos permitirá evaluar los beneficios que otorga el frenado regenerativo en el minibús UNAM en términos de ahorro de energía.

Para tomar en cuenta la eficiencia de la batería en el cálculo de la *eficiencia del frenado regenerativo* y del *consumo de operación por ciclo*, la energía proporcionada y recuperada por la batería no se calcula en función del voltaje entre sus bornes, sino en función de su voltaje en circuito abierto ( $V_{OC}(t)$ ), lo que permite tomar en cuenta las pérdidas en la resistencia parásita de la batería. Así, el cálculo de la energía en el banco de baterías ( $E_b(t)$ ) del vehículo está dado por la ec 4.4.

$$E_b(t) = \int_0^t V_{OC}(t) i_b(t) dt \quad (4.4)$$

También se intenta caracterizar al frenado regenerativo al encontrar su efecto en la descarga de baterías después de operar al vehículo durante un número grande de ciclos de conducción.

Para los fines anteriores, se realizan en esta sección tres tipos de pruebas que son:

- **Eficiencia de frenado.-** Estas pruebas consisten en realizar simulaciones, cada una con un nivel de frenado distinto, bajo el siguiente criterio: la velocidad al momento de comenzar el frenado es la misma para todas las simulaciones.
- **Consumo de operación por ciclo.-** Estas pruebas se realizan con base en ciclos de conducción ideales básicos, variando el nivel de frenado de cada ciclo de conducción en cada simulación, bajo el siguiente criterio: la distancia recorrida en el ciclo de conducción es la misma para todas las simulaciones.
- **Efecto del frenado regenerativo en la descarga del banco de baterías.-** Estas pruebas tienen la finalidad de evaluar el comportamiento de la descarga  $Q(t)$  en recorridos largos (gran número de ciclos de conducción) con y sin frenado regenerativo. El tipo de ciclo utilizado en esta prueba es el SAE tipo B, que es el que más se asemeja al tipo de ciclo con el que se pretende opere normalmente el minibús UNAM.

Como es necesario que la caracterización de frenado regenerativo se haga con base en simulaciones cuyo funcionamiento sea lo más parecido al comportamiento real, y como se prevee que el minibús UNAM de funcionar sólo con el sistema eléctrico contaría con una estrategia de frenado parecida a la de la G-Van, que permita combinar de manera "suave" los

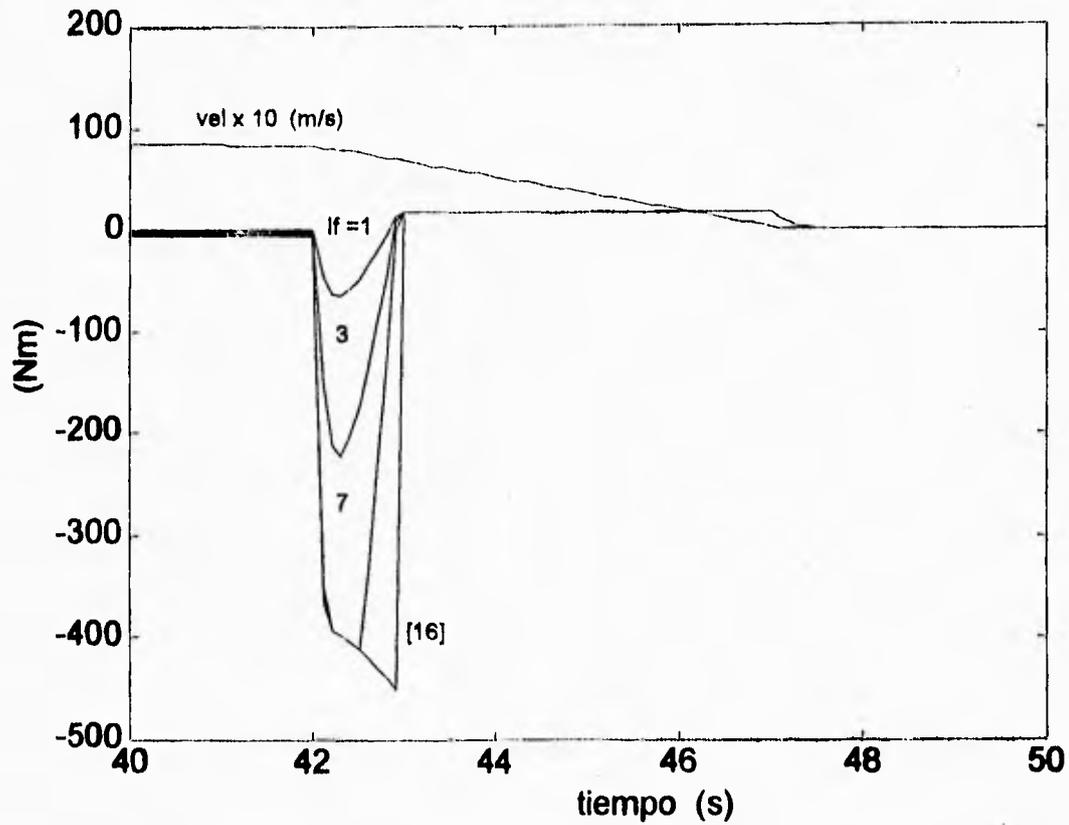
frenados eléctrico y disipativo, se propone utilizar para estas pruebas la estrategia de frenado de la G-Van, por lo que dentro del bloque *Piloto* del esquema del simulador se sustituye el bloque *Estrategia de frenado* por el de *Estrategia de frenado G-Van*.

Como ya se mencionó, por nivel de frenado se entiende un valor de desaceleración constante expresado en valor absoluto. Para las pruebas de eficiencia de frenado y consumo de operación por ciclo, se utilizan diferentes niveles de frenado que van desde  $0.1 \text{ m/s}^2$  (que es un frenado muy suave) hasta  $5 \text{ m/s}^2$  (que es un frenado muy intenso y prácticamente de emergencia). El incremento en los niveles de frenado se hace de manera logarítmica: 0.1, 0.2, 0.3, . . . , 0.9, 1, 2, 3, . . . , 5 en  $\text{m/s}^2$ .

### **Eficiencia de frenado**

Para llevar a cabo las pruebas orientadas al cálculo de la eficiencia de frenado regenerativo, se decidió empezar el frenado en cada simulación a partir de la velocidad crucero del minibús UNAM (11 m/s), velocidad a la cual se cuenta con 393.25 kJ de energía disponible para ser recuperada (la masa del vehículo es de 6500 kg). Las simulaciones se realizan en condiciones de pendiente cero (en plano).

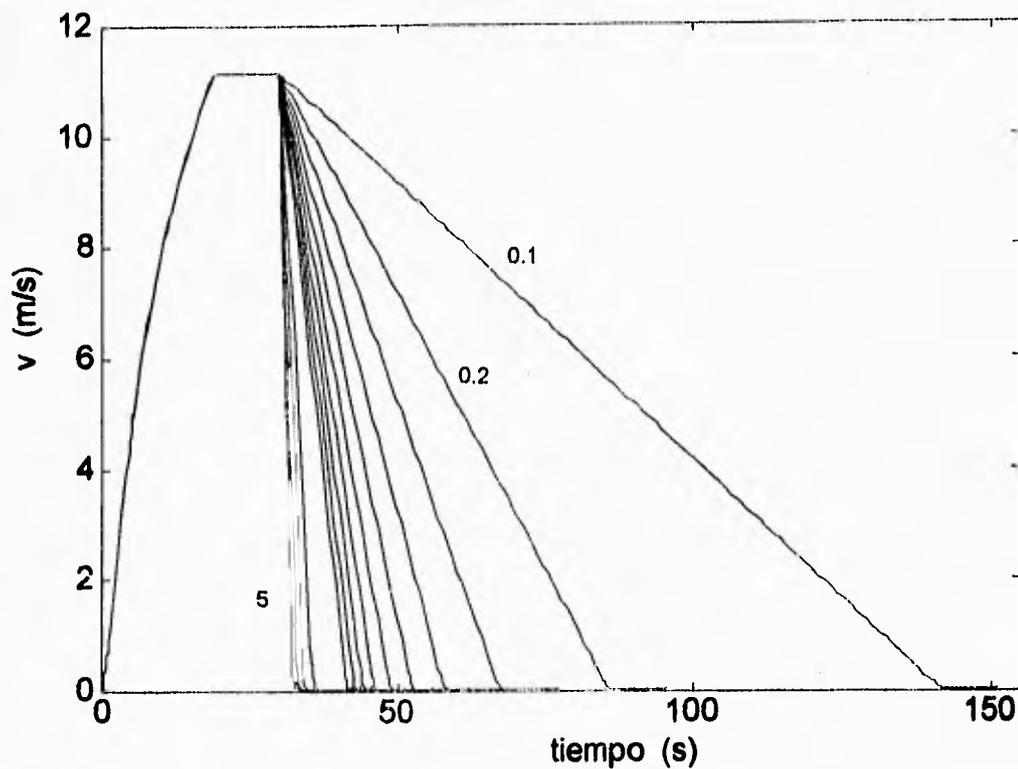
En lo que respecta al archivo de parámetros, se crea un nuevo archivo **autodef3.m** que tiene los mismos datos que el **autodef2.m** (presentado al final de la sección 3.8) pero con la inclusión de los parámetros asociados a la estrategia de frenado de la G-Van. Cabe recordar que en la estrategia de frenado de la G-Van, la capacidad de regeneración puede modificarse por el valor asignado al parámetro  $I_f$ , de tal manera que entre más grande sea su valor, el vehículo regenera más energía en el frenado. Se ejecutaron algunas simulaciones (Fig 4.22) con diferentes valores de  $I_f$  para encontrar bajo cual valor se obtiene un máximo de regeneración sin perder la disminución "suave" del par eléctrico al acercarse la velocidad al límite  $v_l$  y sin incrementar el par eléctrico de referencia más allá del calculado por el controlador PI. Se encontró que un valor de  $I_f$  de 7, como se observa en la Fig 4.22, cumple con lo anterior. En dicha gráfica se incluye también (para comparación) el par eléctrico de frenado que se produce aplicando sólo la estrategia de frenado recomendada en [16] que como se observa termina de manera brusca.



**Fig 4.22** Par de frenado en un ciclo SAE tipo B para diferentes valores de  $I_f$

Así, se decidió realizar dos conjuntos de pruebas de eficiencia de frenado, el primero con un valor de  $I_f$  bajo, o sea, de uno y el segundo con uno alto, de siete.

En la siguiente figura se muestra en una misma gráfica la velocidad del minibús bajo diferentes niveles de frenado.



**Fig 4.23** Velocidad del minibús bajo distintos niveles de frenado

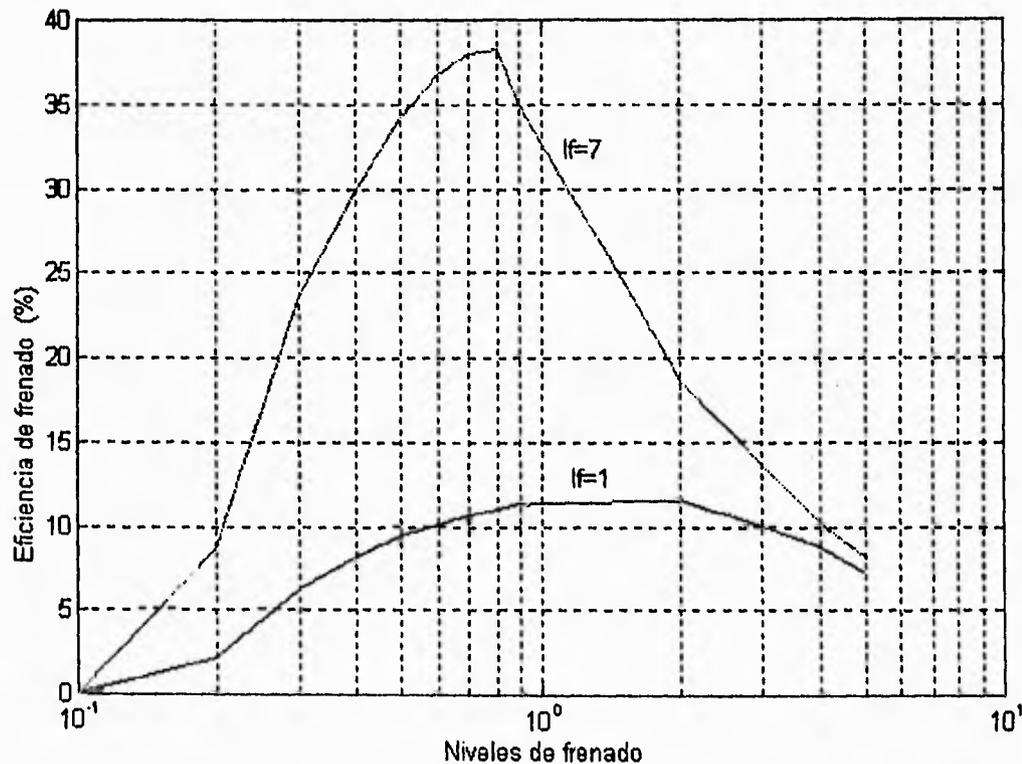
Para cada nivel de frenado se recupera una cantidad determinada de energía en las baterías tal como se indica en la tabla que sigue:

Nivel de frenado (m/s <sup>2</sup> )	Energía recuperada en el banco de baterías	Energía recuperada en el banco de baterías
	If = 1 (kJ)	If = 7 (kJ)
0.1	0	0
0.2	8.4	34.1
0.3	24.4	92.9
0.4	31.9	117.2
0.5	36.7	134.4
0.6	39.7	144.5
0.7	41.7	149.6
0.8	43.2	150.1
0.9	44.4	137.6

1	44.8	128.4
2	45.3	73.5
3	39.1	54
4	34.4	40.3
5	28	32.3

**Fig 4.24** Energía recuperada durante el frenado

A partir de la tabla anterior se observa como efectivamente al aumentar  $I_f$ , la cantidad de energía recuperada en el banco de baterías aumenta. Las curvas de eficiencia de frenado regenerativo del minibús calculadas con base en los datos de la tabla anterior (Fig 4.24) se muestran en la siguiente figura:



**Fig 4.25** Curva de eficiencia de frenado regenerativo

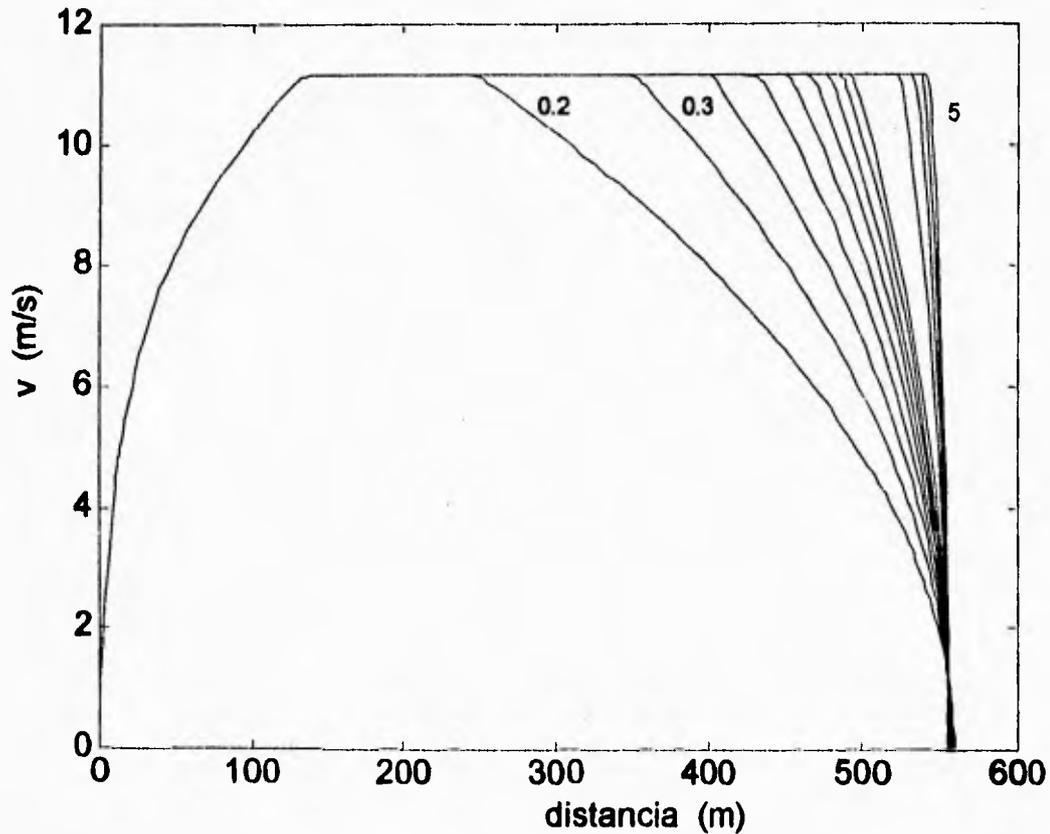
Como se puede observar en esta última gráfica, existe una región de máxima eficiencia para cada curva. Para la curva obtenida con  $I_f = 1$  dicha región comprende valores de frenado entre  $0.8$  y  $1 \text{ m/s}^2$ . Para la curva con  $I_f = 7$ , se observa que con valores de frenado alrededor de  $0.8 \text{ m/s}^2$  la eficiencia de frenado es máxima con un valor de alrededor del 38%, lo que en

la práctica es muy bueno. La eficiencia de frenado cae a cero para niveles de frenado grandes debido a la saturación del sistema de tracción (esto es por el límite de par y corriente del sistema de tracción) y también porque entre más grande es el nivel de frenado se exige una corriente más grande y las pérdidas por efecto Joule en motor y baterías aumentan con el cuadrado de dicha corriente. Por otro lado, la eficiencia de frenado decae para niveles bajos de frenado ya que conforme disminuye el nivel de frenado, las fuerzas de fricción van siendo suficientes para detener al vehículo.

Hay que interpretar las curvas de la Fig 4.25 con cuidado pues podría pensarse que de dicha información se deduce que hay que tratar de operar al vehículo en el frenado en los niveles de mayor eficiencia de frenado, en realidad como se verá más adelante, lo mejor en cuanto a ahorro de energía es frenar con el menor nivel de frenado posible. Lo que si puede concluirse de la Fig 4.25 es que deben evitarse, en la medida de lo posible, los frenados de un nivel más grande que el asociado a la eficiencia de frenado máxima.

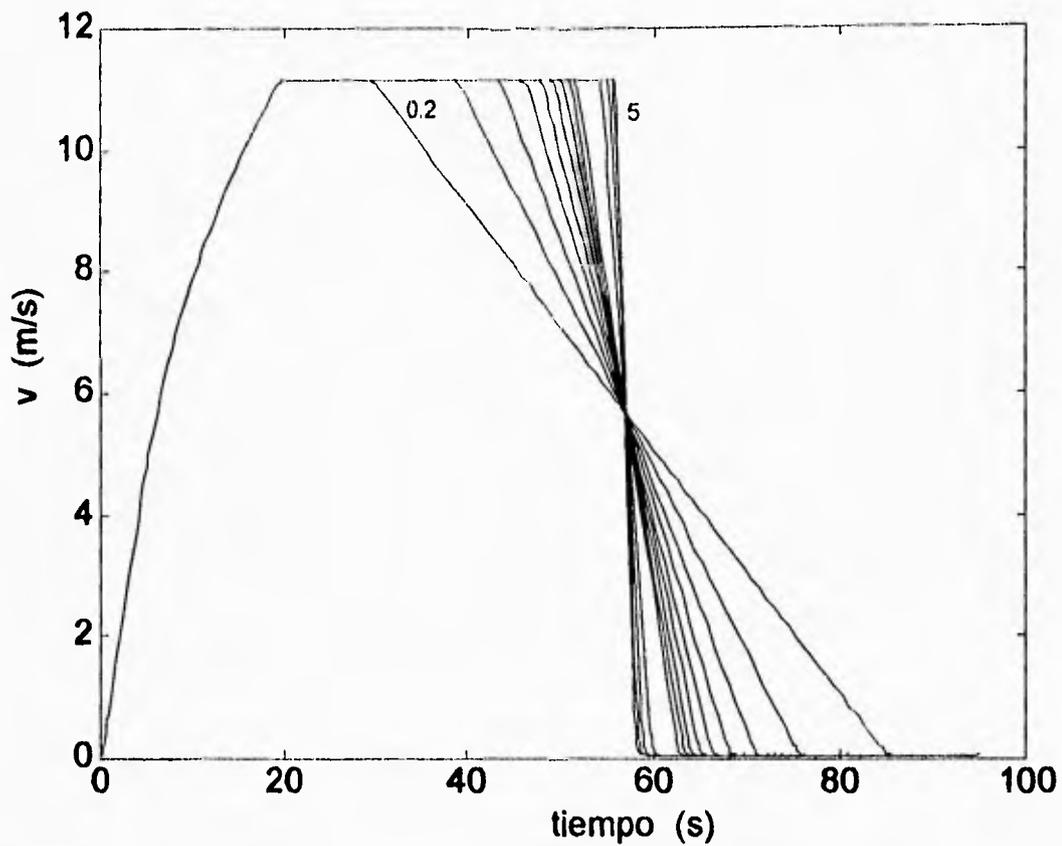
### Consumo de operación por ciclo de conducción

Estas pruebas están diseñadas para evaluar el efecto del frenado regenerativo en el ahorro de energía al operar al minibús bajo un ciclo de conducción. Se hacen simulaciones con diferentes niveles de frenado (desde 0.2 a 5 m/s<sup>2</sup>) con la característica de que en las simulaciones el vehículo recorre la misma distancia tal como se muestra en la Fig 4.26.



**Fig 4.26** distancia recorrida vs velocidad en el minibús bajo distintos niveles de frenado

Los perfiles de velocidad con respecto al tiempo, bajo los cuales se realizan las simulaciones se muestran en la siguiente gráfica:



**Fig 4.27** Perfil de velocidad bajo distintos niveles de frenado

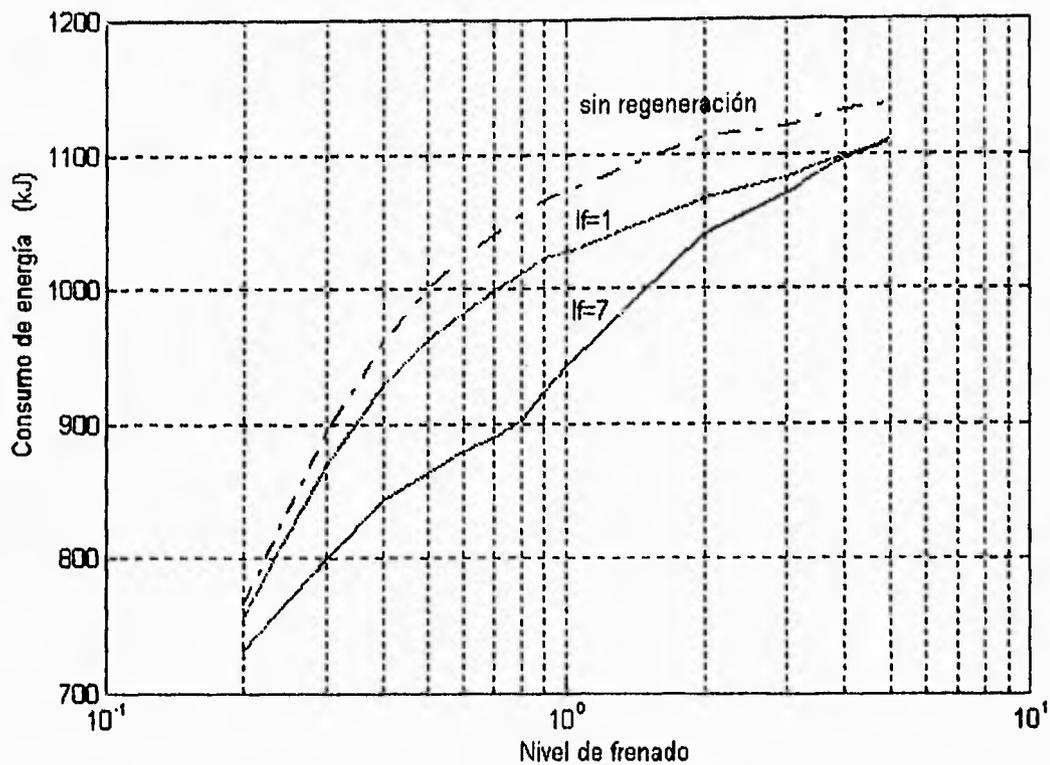
Para evaluar el efecto del valor de  $I_f$  en el ahorro de energía del minibús, las pruebas se realizan para valores de  $I_f$  de uno y de siete. Se hizo adicionalmente una simulación sin frenado regenerativo, para disponer de una referencia bajo la cual poder comparar cuantitativamente el efecto de regeneración. El consumo de operación por ciclo de conducción se muestra en la siguiente tabla:

Nivel de frenado (m/s <sup>2</sup> )	Energía consumida en el banco de baterías If = 1 (kJ)	Energía consumida en el banco de baterías If = 7 (kJ)	Energía consumida en el banco de baterías sin frenado regenerativo (kJ)
0.2	757.6	732.2	767.7
0.3	870.9	800.7	895.5
0.4	928.4	843.2	960.8
0.5	962.7	864.1	999.8
0.6	981.6	879.7	1023.5
0.7	998.2	890.2	1040.2
0.8	1011.9	902.5	1055.5
0.9	1022.4	923	1066.6
1	1026.7	942.9	1073.6
2	1066.9	1040.2	1113.2
3	1082.4	1070.6	1120.9
4	1098.5	1096.2	1132.7
5	1110	1109.6	1137

**Fig 4.28** Energía consumida por ciclo de conducción

Como se observa, al aumentar la capacidad de frenado regenerativo a siete, el consumo por ciclo puede disminuir hasta en un 14.5 %, como es el caso del ciclo de conducción con un nivel de frenado de 0.8 m/s<sup>2</sup>.

En la fig 4.29 se presenta en forma gráfica los resultados del consumo de operación:



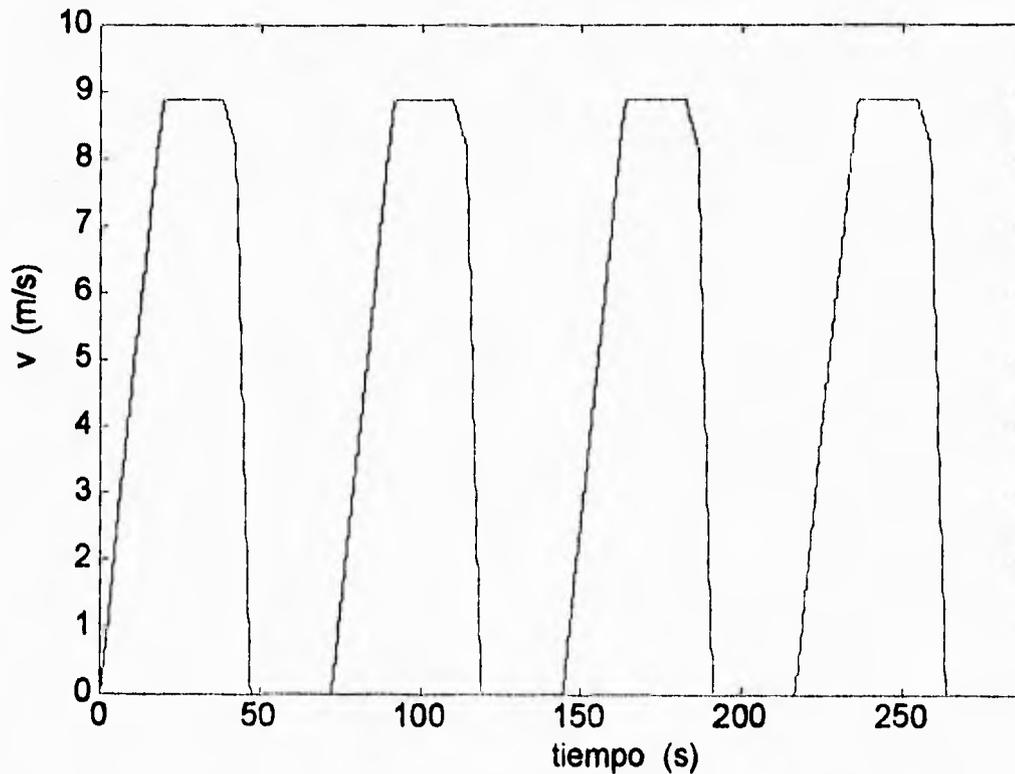
**Fig 4.29** Consumo de operación sin regeneración (--) y con regeneración (-)

Lo primero que se observa en la Fig 4.29 es que en cuanto al consumo de energía, siempre es mejor frenar lo más suave posible donde el límite inferior de nivel de frenado está asociado al frenado que se produce por efecto sólo de las fuerzas resistivas; pero esto también debe interpretarse cuidadosamente, puesto que en la operación del minibus también es importante utilizar el menor tiempo posible para ir de un lugar a otro. De hecho, un problema interesante para futuros trabajos sería el de encontrar (si existe) el nivel de frenado que optimiza el consumo de energía y el tiempo utilizado para recorrer la misma distancia.

Al comparar los resultados obtenidos para los dos valores de capacidad de frenado regenerativo en la región de niveles de frenado entre 0.6 y 1  $m/s^2$  (que se identifica como la región de mayor eficiencia de frenado) para las dos intensidades, se observa que para un valor de  $I_f = 7$ , se puede alcanzar un ahorro de hasta aproximadamente tres veces el que se logra con  $I_f = 1$ . También se observa que para niveles de frenado extremos, bajos y altos, el consumo de energía es prácticamente igual para cualquier valor de  $I_f$ , esto se debe a que conforme se avanza hacia dichos extremos, el frenado regenerativo disminuye gradualmente su participación.

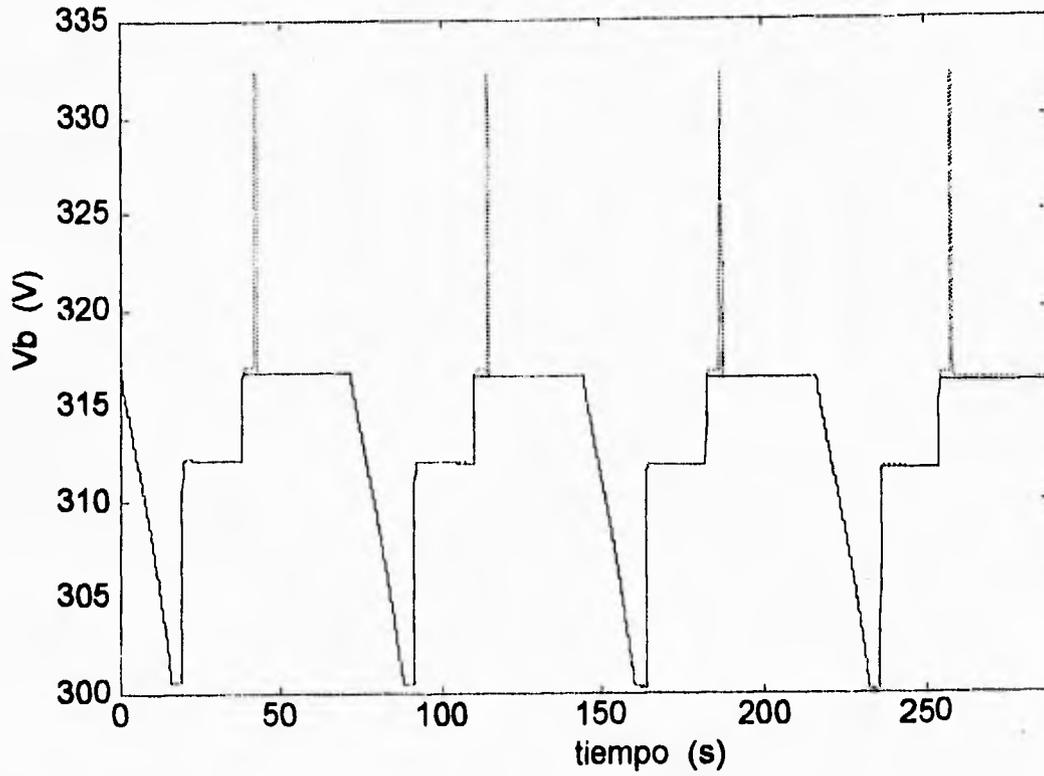
### Efecto del frenado regenerativo en la descarga del banco de baterías

Para evaluar el efecto del frenado regenerativo en la descarga de las baterías en un recorrido largo, se realizan simulaciones con cien ciclos de conducción SAE tipo B, con y sin frenado regenerativo. Las simulaciones que se realizan con frenado regenerativo se hacen, una con la estrategia de frenado G-Van con un valor de  $I_f$  alto ( $I_f=7$ ) y la otra con la estrategia de frenado recomendada en [16] (para disponer de una referencia de máxima regeneración). Un ejemplo del perfil de velocidad usado en la simulación se muestra en la Fig 4.30, en la que se presentan únicamente los cuatro primeros ciclos simulados.

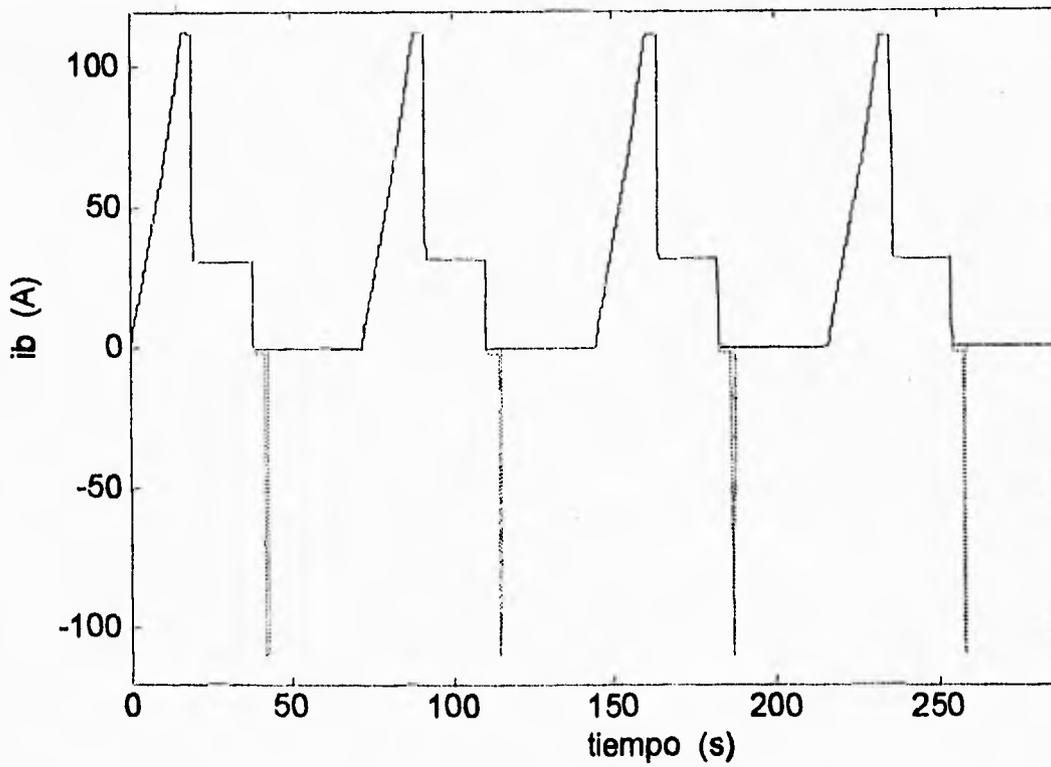


**Fig 4.30** Perfil de velocidad simulado (cuatro ciclos SAE tipo B)

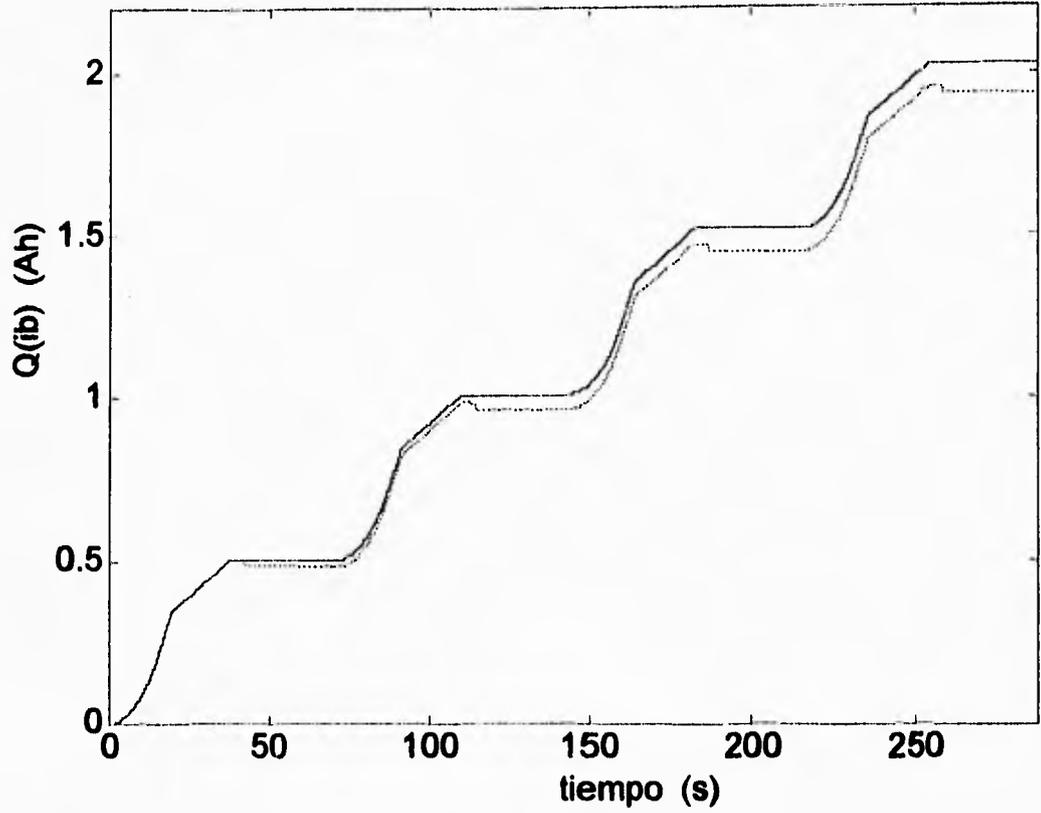
Para que se aprecie el efecto de incluir o no el frenado regenerativo, se presentan a continuación el comportamiento del voltaje (Fig 4.31), corriente (Fig 4.32) y descarga (Fig 4.33) en baterías obtenidos con y sin frenado regenerativo para los cuatro ciclos de conducción anteriores. Las curvas con el frenado regenerativo corresponden al caso en que se utiliza la estrategia de frenado G-Van ( $I_f = 7$ ).



**Fig 4.31**  $V_b(t)$  vs  $t$  sin regeneración (-), y  $V_b(t)$  vs  $t$  con regeneración (--)

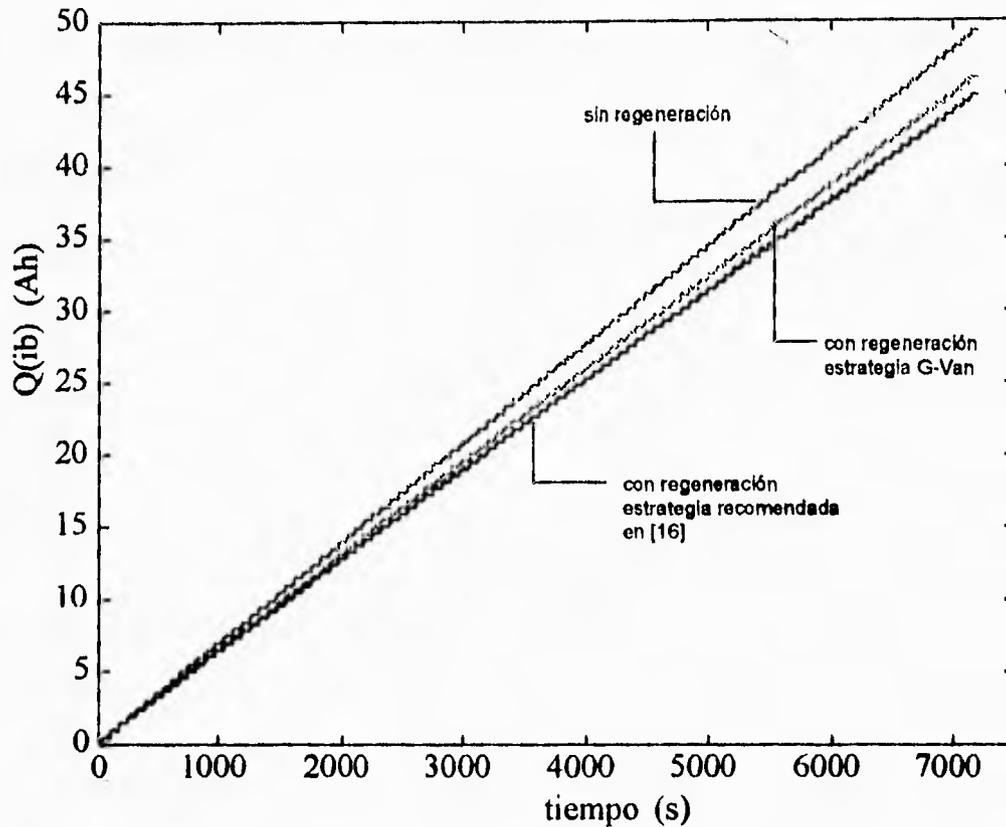


**Fig 4.32**  $i_b(t)$  vs  $t$  sin regeneración (-), y  $i_b(t)$  vs  $t$  con regeneración (--)



**Fig 4.33**  $Q(i_b)$  vs t sin regeneración (-) vs  $Q(i_b)$  vs t con regeneración (-)

Los resultados de la simulación para los cien ciclos ya mencionados se muestran en la siguiente figura en la que se presenta el comportamiento de la descarga bajo las diferentes condiciones ya comentadas.



**Fig 4.34**  $Q(i_b)$  vs  $t$  sin regeneración,  $Q(i_b)$  vs  $t$  con regeneración y estrategia G-Van, y  $Q(i_b)$  vs  $t$  con regeneración y estrategia [16]

A partir de la gráfica anterior, se observa lo siguiente:

1. Si se emplea la estrategia G-Van, la descarga del banco de baterías es 3.5 Ah menor que para el caso en que no se dispusiera de frenado regenerativo, lo que representa un ahorro del 7 % de energía eléctrica en el banco de baterías aproximadamente.
2. Si se emplea la estrategia recomendada en [16], el banco de baterías se descarga 4.7 Ah menos que para el caso en que no se dispusiera de frenado regenerativo, lo que representa un ahorro del 9.5 % de energía eléctrica en el banco de baterías aproximadamente.

De acuerdo con los datos del fabricante de autos eléctricos, las cifras de ahorro de energía por el uso del frenado regenerativo van del 10 % al 60 % [18]. Se observa que los porcentajes de

ahorro obtenidos se ubican alrededor del nivel más bajo del rango mencionado. Las razones por las cuales estas cifras son relativamente bajas son:

1. Para un ciclo SAE tipo B existe una región relativamente grande de marcha libre, en la que no existe frenado regenerativo.
2. El nivel de frenado asociado a un ciclo SAE tipo B es alto, esto es poco eficiente.
3. La velocidad a partir de la cual se empieza el frenado regenerativo es muy cercana al valor de la velocidad límite  $v_l$ , a partir de la cual el frenado regenerativo deja de emplearse.

## **CONCLUSIONES**

Para cumplir el objetivo de este trabajo, que es el de realizar la caracterización del frenado regenerativo eléctrico del minibús UNAM, fue necesario diseñar, desarrollar y evaluar con datos reales un simulador de vehículos eléctricos, tarea que se llevó a cabo en dos partes de manera paralela; la parte que involucra al sistema de propulsión eléctrico se desarrolló en este trabajo y la otra que consistió en el diseño y realización del modelo mecánico del minibús así como el del sistema auxiliar hidroneumático y la estrategia de combinación de los sistemas de tracción, se efectuó en [1]. Hay que agregar que para la caracterización del frenado regenerativo es necesario contar únicamente con la parte del sistema de propulsión eléctrico en conjunto con el modelo mecánico del minibús UNAM.

Se logró hacer una primera caracterización del frenado regenerativo para el caso del minibús UNAM. Esta caracterización consistió básicamente de curvas de eficiencia de frenado y de consumo de energía para diferentes niveles de frenado. Dichas curvas dan una idea más precisa de lo que se puede esperar de la aplicación del frenado regenerativo. Por ejemplo, al analizar la curva de la eficiencia de frenado se observa que dicha eficiencia es muy sensible a las variaciones del nivel de frenado y que hay un nivel de frenado óptimo (en cuanto a dicha eficiencia) y que la magnitud decae rápidamente con niveles de frenado mayores o menores que dicho óptimo. Lo anterior ilustra la dificultad de dar cifras precisas de recuperación de energía en un vehículo pues las diferencias en la operación del mismo pueden cambiar notablemente el porcentaje de energía recuperada.

Durante la realización de las simulaciones y al enfrentar problemas de la capacidad de almacenamiento de datos, saturación de memoria RAM y relativa lentitud en las simulaciones, se observó la necesidad de contar con recursos de cómputo con altas prestaciones, que dispusieran de un mínimo de memoria RAM de 8 MB, velocidad de

procesamiento alta, asociada a un reloj de por lo menos 60 MHz, aunque uno de 100 MHz es recomendable, gran capacidad de almacenamiento de datos, se recomienda contar con un disco duro de 520 MB debido a la gran cantidad de información que se genera con el uso del simulador, principalmente por las gráficas.

En lo que respecta al modelo del simulador, es conveniente destacar que esta primera versión debe ser considerada como una primera aproximación buena bajo la cual se pueda trabajar con más profundidad para corregir fallas que se encuentren sobre la marcha o aumentar la precisión en los datos calculados. Algunos de los problemas abiertos para su mejora se enumeran enseguida:

1. Sustituir el control PI usado en el bloque *Piloto* por un controlador que libere al usuario del simulador de la necesidad de calibrarlo. Un controlador autosintonizable o uno adaptable podría ser la solución.
2. Desarrollar un modelo dinámico de baterías de plomo ácido que modele el proceso de recuperación de voltaje después de una descarga y que pueda predecir el deterioro de las mismas.
3. Incluir las eficiencias del manejador y del tren de transmisión en el simulador.
4. Identificar las pérdidas de amortiguamiento viscoso asociadas a los equipos de tracción, para su inclusión en el simulador.
5. Tomar en cuenta el consumo de los equipos auxiliares
6. Analizar el efecto de las condiciones atmosféricas en el comportamiento de los vehículos (temperatura, viento, humedad, etc).

Algunos de estos problemas son muy complejos, sobretodo el que toca a la obtención de un modelo que involucre el deterioro de una batería principalmente por la dificultad de medir dicho deterioro. Sin embargo, conseguir dicho modelo sería de gran importancia para evaluar con mayor precisión la utilidad de una propulsión híbrida, como es el caso de la del minibús UNAM.

Uno de los resultados obtenidos en este trabajo consistió en la evaluación del simulador con base en los datos reales de una camioneta eléctrica de baterías, G-Van. Con el uso de dichos datos y con pruebas de simulación, pudo concluirse que el nivel de confianza para el empleo del simulador con el modelo del minibús UNAM es razonablemente bueno.

Uno de los objetivos más importantes que se desea conseguir con el simulador consiste en obtener una idea más precisa sobre el desempeño esperado del vehículo eléctrico bajo diferentes condiciones de operación, en este sentido se puede decir que con esta primera versión, se ha conseguido esto en buena medida ya que se pueden realizar fácilmente pruebas variando una gran cantidad de dichas condiciones de operación, tales como características del vehículo: peso, resistencia al rodamiento, etc., ciclos de conducción, pendientes en el recorrido, diferentes estrategias de frenado, carga en las baterías, eficiencia de los componentes, relaciones de reducción en el tren de transmisión, etc.

"Non piú, signor, non piú di questo canto;  
ch'io sono già rauco, e vó posarmi alquanto"

Ariosto

---

## REFERENCIAS

---

- [1] M. Estrada *Verificación de una Estrategia de Control del Sistema de Propulsión Híbrido del Minibús Eléctrico de Baterías UNAM*, Tesis de licenciatura de la Facultad de Ingeniería, UNAM, Director P. Lara, México, D.F. (1995).
- [2] R. Chicurel, P. Lara, et al *Diseño y Construcción de un Minibús Eléctrico de Baterías*, 1<sup>er</sup> informe de avance, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 1993.
- [3] Mannesmann *REXROTH INDRAMAT KDA AC Vector Drive, user's manual* Publication Number I A74776, Rev. B, August 1992, Wood Dale, Illinois.
- [4] *SIMULINK User's Guide by the Math Works, Inc.*, March 1992, pg 2-31 - 2-32 y 4-18 - 4-136
- [5] S. Rohde, y N. Schilke *The Fuel Economy Potential of Heat Engine/Flywheel Hybrid Vehicles*, Mechanical Research Department General Motors Research Laboratories, Warren, Michigan. (176).
- [6] P. Fishbane, S. Gasiorowicz y S. Thornton, Stephen *Física para Ciencias e Ingeniería* Prentice-Hall Hispanoamericana. México, 1993. (140-141).
- [7] R. Gabriel, W. Leonhard y C. Nordby, *Field-Oriented Control of a Standard AC Motor using Microprocessors*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol, IA-16, NO.2, March/April 1980, pg 187.
- [8] S. Dewan, G. Slemon y A. Straughen, *Power Semiconductor Drives*, John Wiley and Sons, 1984, pg 341-343.
- [9] S. Chapman *Máquinas Eléctricas*, México D.F., McGraw Hill, 1988.
- [10] H. Bühler *Electronique de Réglage et de Commande*, Dunod, France 1983, pg 192.
- [11] N. Mohan, T. Undeland, W. Robbins *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, John Wiley and Sons, 1989, pg 66-69.

- [12] F. Wicks y D. Marchionne *Development of a Model to Predict Electric Vehicle Performance Over a Variety of Driving Conditions*, pg 3-155 - 3-157.
- [13] *SAE Recommended Practice, Electric Vehicle Test Procedure*, SAE J227a, 6.2.1-6.2.4
- [14] G. Franklin, J. Powell y A. Emami-Naeini *Control de Sistemas Dinámicos con Retroalimentación*, Addison-Wesley Iberoamericana, S.A., pg 445
- [15] F. Wyczalek y T. Wang *Electric Vehicle Regenerative Braking* pg 3-187 - 3-189
- [16] Ayres McKenna *Alternatives to the Internal Combustion Engine (ICE)*, pg 201
- [17] *Electric G-Van* Electric Power Research Institute, EU.2019.5.89.R.
- [18] *Current Events, Keeping up with Solectria*, Volume 1, Number 1, July 1993, pg 4

Listado del programa generador de ciclos de conducción, **ciclos.m**:

```
clc
con=1;
while con==1;
clc
disp(' GENERACIÓN DE CICLOS DE CONDUCCIÓN ')
disp(' ')
disp(' ')
disp(' 1) Ciclo de conducción ideal')
disp(' ')
disp(' 2) Ciclo de conducción experimental')
disp(' ')
disp(' 3) Salir ')

e1=input(' ¿Qué opción desea? ');
clc

if e1==1;

cond=1;
while cond==1;
disp(' ')
disp(' 1) Ciclo de conducción ideal básico')
disp(' ')
disp(' 2) Ciclo de conducción ideal SAE')
disp(' ')
disp(' 3) Menú anterior')

e2=input(' ¿Qué opción desea? ');
clc

if e2==1;

disp(' ')
disp(' Introduzca las características del perfil de pendiente:')
disp(' ')
a=input(' Número de etapas del perfil de pendiente= ');
i1=input(' Incremento del vector de distancia [m]= ');
o1=input(' Distancia inicial [m]= ');
```

```

disp(' ')
z=[1;1];
Ba=0;
for i=1:a,
    fprintf(' Distancia final de la etapa %g ',i);
    t1=input(' [m] = ');
    disp(' ')
    l=0:1:i:t1;
    fprintf(' Valor de la pendiente en la etapa %g ',i);
    y=input(' [%] = ');
    disp(' ')
    y=atan(y/100);
    for j=1:length(l),
        z(1,Ba+j)=l(j);
        z(2,Ba+j)=y;
    end
    o1=l(length(l));
    Ba=Ba+length(l);
end
x=z(1,:);
teta=z(2,:);
teta1=tan(teta)*100;
pendiente=[x;teta1];
clc

disp(' ')
disp(' Introduzca las características del perfil de velocidad:')
disp(' ')
vmax=input(' Velocidad máxima [km/h]= ');
m1=input(' Pendiente de aceleración [m/s2]= ');
tc=input(' Tiempo de velocidad máxima constante [s]= ');
m2=input(' Pendiente de desaceleración [m/s2]= ');
ts=input(' Tiempo de velocidad nula (paro) [s]= ');
%nc=input(' Número de ciclos= ');
sel=1;
m2=-m2;
vmax=vmax*(1000/3600);
x1=vmax/m1;
x2=tc+x1;
x3=(-vmax/m2)+x2;
x4=ts+x3;
t1=0:0.01:x1;
t2=x1:0.01:x2;
t3=x2:0.01:x3;
t4=x3:0.01:x4;

```

```

tac=x1;
tc=tc;
tf=x3-x2;
ts=ts;
ttot=tac+tc+tf+ts;
v1=m1*t1;
v2=0*t2+vmax;
v3=(-vmax/(x3-x2))*t3+(vmax/(x3-x2))*x2+(vmax);
v4=0*t4;
%ST=ttot*nc;
t=[t1,t2,t3,t4];
vr=[v1,v2,v3,v4];
ta=0;
tcr=0;
tco=0;
ts=0;

subplot(211)
plot(t,vr)
grid
title ('Ciclo de conducción ideal básico')
xlabel('tiempo [s]')
ylabel('velocidad [m/s]')
subplot(212)
plot(x,teta1)
grid
xlabel('distancia [m]')
ylabel('pendiente [%]')
cond=2;
con=2;
disp(' ')
disp(' ')
disp(' Listo para seleccionar "start" en el menú "simulation" de')
disp(' la barra de menús de la ventana del simulador.')

elseif e2==2;

disp(' ')
disp(' 1) Etapa para identificar la velocidad final de ')
disp('   marcha libre asociada al ciclo SAE elegido')
disp(' ')
disp(' 2) Generación del ciclo SAE')
disp(' ')
disp(' 3) Menú anterior')

```

```

e3=input(' ¿Qué opción desea? ');
clc

if e3==1;

    disp(' ')
    disp(' Eliga el patrón de conducción SAE:')
    disp(' ')
    disp(' ')
    disp(' 1) A')
    disp(' ')
    disp(' 2) B')
    disp(' ')
    disp(' 3) C')
    disp(' ')
    disp(' 4) D')

    temp=input(' ¿Qué opción desea? ');

    if temp==1;

        Vc=16;
        ta=4;
        tcr=0;
        tco=2;
        tb=3;
        ti=30;

    elseif temp==2;

        Vc=32;
        ta=19;
        tcr=19;
        tco=4;
        tb=5;
        ti=25;

    elseif temp==3;

        Vc=48;
        ta=18;
        tcr=20;
        tco=8;
        tb=9;
        ti=25;

```

```
elseif temp==4;
```

```
Vc=72;  
ta=28;  
tcr=50;  
tco=10;  
tb=9;  
ti=25;
```

```
end
```

```
x=input(' Distancia estimada a recorrer bajo el ciclo SAE [m]= ');  
x=[0 x];  
teta=[0 0];
```

```
sel=-1;  
Vc2=(1000/3600)*Vc;  
t1=0:0.01:ta;  
t2=ta:0.01:(ta+tcr);  
t3=(ta+tcr):0.01:(ta+tcr+tco+tb+ti);  
v1=(Vc2/ta)*t1;  
v2=0*t2+Vc2;  
t1b=ta+tcr;  
t3b=ta+tcr+tco+tb+ti;  
m3=(Vc2/(t3b-t1b));  
v3=-m3*t3+m3*t1b+Vc2;  
ST=t3b;  
t=[t1,t2,t3];  
vr=[v1,v2,v3];  
cond=2;  
con=2;  
disp(' ')  
disp(' ')  
disp(' Listo para identificar, seleccione "start" en el menú')  
disp(' "simulation" de la barra de menús de la ventana del simulador y')  
disp(' una vez terminada, ejecute nuevamente el programa y elija la opcion:')  
disp(' 2) Generación del ciclo SAE')
```

```
elseif e3==2;
```

```
clc  
disp(' Opción que genera el ciclo SAE una vez identificada')  
disp(' la velocidad final de marcha libre')
```

```

SV=size(vel);
SV=SV(1,1);
vel=vel(SV,:);
sel=1;
t3=(ta+tcr):0.01:(ta+tcr+tco);
t4=(ta+tcr+tco):0.01:(ta+tcr+tco+tb);
t5=(ta+tcr+tco+tb):0.01:(ta+tcr+tco+tb+ti);
v1=(Vc2/ta)*t1;
v2=0*t2+Vc2;
t1bis=ta+tcr;
t2bis=ta+tcr+tco;
t3bis=ta+tcr+tco+tb;
m3=(Vc2-vel)/(t2bis-t1bis);
v3=-m3*t3+m3*t1bis+Vc2;
m4=vel/(t3bis-t2bis);
v4=-m4*t4+m4*t2bis+vel;
v5=0*t5;
t=[t1,t2,t3,t4,t5];
vr=[v1,v2,v3,v4,v5];

subplot(211)
plot(t,vr)
grid
title ('Ciclo de conducción ideal SAE')
xlabel('tiempo [s]')
ylabel('velocidad [m/s]')
subplot(212)
plot(x,teta)
grid
xlabel('distancia [m]')
ylabel('pendiente [%]')
cond=2;
con=2;
disp(' ')
disp(' Listo para seleccionar "start" en el menú "simulation" de')
disp(' la barra de menús de la ventana del modelo.')

elseif e3==3;
end
elseif e2==3;
cond=2;
end
end

elseif e1==2;

```

```

condic=1;
while condic==1;

disp(' 1) Ver requerimientos de los vectores de datos')
disp(' ')
disp(' 2) Cargar los vectores t.mat, v.mat, x.mat y teta.mat')
disp(' en el espacio de trabajo de MATLAB')
disp(' ')
disp(' 3) Menú anterior')

e4=input(' ¿Qué opción desea? ');
clc

if e4==1;

disp(' ')
disp(' Guarde los vectores de datos experimentales en el')
disp(' subdirectorio del paquete MATLAB donde se encuentra')
disp(' el archivo del simulador.')
disp(' Los vectores de datos correspondientes al tiempo,')
disp(' distancia, velocidad y pendiente han de nombrarse')
disp(' t.mat, x.mat, vr.mat y teta.mat, respectivamente.')
disp(' Los dos primeros deberán ser monotonicamente crecientes.')
disp(' Las parejas: t.mat, vr.mat y x.mat, teta.mat deben')
disp(' ser de igual dimensión y estar en código ASCII.')
disp(' Los datos de los vectores deben estar en unidades del')
disp(' Sistema Internacional: vr (m/s), t (s), teta (rad) y x (m)')
disp(' ')
disp(' ')
disp(' Pulse la tecla "Return" para regresar al menú anterior')
pause
clc

elseif e4==2;

sel=1;
load t;
load vr;
load x;
load teta;
ta=0;
tcr=0;
tco=0;
teta1=tan(teta)*100;

```

```

subplot(211)
plot(t,vr)
grid
title ('Ciclo de conducción experimental')
xlabel('tiempo [s]')
ylabel('velocidad [m/s]')
subplot(212)
plot(x,teta1)
grid
xlabel('distancia [m]')
ylabel('pendiente [%]')
condic=2;
con=2;
disp(' ')
disp(' ')
disp(' Establezca el tiempo de paro de la simulación en la opción')
disp(' "parameters" del menú "simulation" de la ventana del simulador.')
disp(' ')
disp(' Para simular seleccione "start" en el mismo menú.')

elseif e4==3;

    condic=2;
    end
end
elseif e1==3;
con=2;
end
end

```