

# SIMULACIÓN DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO EN EL LABORATORIO. BALANCE DE POTENCIAS

Manuel Casal Gómez-Caminero  
Pedro Cruz Romero  
Manuel Burgos Payán  
Ángel Gaspar González Rodríguez  
José María Maza Ortega  
Carlos Izquierdo Mitchell

Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Sevilla  
Escuela Superior de Ingenieros

## RESUMEN

Se describe una actividad de innovación educativa en el área de máquinas eléctricas, encuadrada en la temática **Técnicas de aprendizaje y diseño de materiales didácticos**, cuyo propósito es el diseño de un módulo de prácticas que simule un vehículo eléctrico. En dicho módulo se realizarán las medidas oportunas que permitan llevar a cabo el balance energético del vehículo en diferentes regímenes de funcionamiento. Para ello se dispondrá de una tarjeta de adquisición de datos y se realizarán los programas de adquisición de medidas y balance de potencias. En cuanto a las metas didácticas resaltar que la práctica pretende aumentar el conocimiento del alumno en el comportamiento de los accionamientos de corriente continua, en el proceso de adquisición de datos, así como en el trabajo de laboratorio.

## ABSTRACT

An innovative educational experience in the electrical machines area, framed in the topic **Learning techniques and educational tools design**, with the aim of designing an electrical vehicle educational laboratory test is described. Several measurements, needed to complete the power balance at several duties, will be undertaken. For this purpose a data acquisition board will be available, as well as the needed programs for the measurements and power balance. In relation with the educational goals, it is emphasized the increase in the knowledge of the direct current drives performance, the data acquisition process, as well as the laboratory work.

## INTRODUCCIÓN

Ante la inquietud existente en la sociedad actual, justamente preocupada por la contaminación (atmosférica, acústica, etc.) que padecen las ciudades, el futuro inmediato del vehículo eléctrico está despertando un gran interés. En este sentido existen ya referencias importantes que avalan su utilidad y eficacia.

El almacenamiento de energía es el problema fundamental con el que se enfrenta hoy día el desarrollo del vehículo eléctrico. Los sistemas de almacenamiento industrialmente disponibles en la actualidad son voluminosos, caros y pesados, y además su capacidad de almacenamiento no es toda la que fuera deseable.

Ante esta perspectiva adquiere una fuerte relevancia la gestión energética del vehículo.

Una buena gestión energética pasa por el conocimiento de las potencia intercambiada y rendimiento de cada uno de los equipos involucrados en el sistema eléctrico de tracción.

Para ello se requiere, en cuanto a equipos en período de servicio, la instalación en el vehículo a controlar de un sistema de adquisición de datos que ha de cumplir unas especificaciones técnicas muy concretas, ya que ha de ser insensible a vibraciones, movimientos bruscos, perturbaciones de tipo electromagnético, etc. Un conjunto de sensores, situados en los puntos adecuados, detectarán las magnitudes a medir y sus respuestas que, previamente acondicionadas, serán capturadas y almacenadas para su posterior análisis mediante el correspondiente programa informático de tratamiento de datos.

El presente proyecto de innovación pedagógica surgió con el objetivo de diseñar un módulo de prácticas que simulara un vehículo eléctrico. En dicho módulo se realizarían las medidas oportunas que permitieran llevar a cabo el balance energético del vehículo en diferentes regímenes de funcionamiento, tales como tracción bajo distintas condiciones, frenado, parada, etc.

El mencionado módulo incluye al motor de tracción, alimentación en corriente continua, carga mecánica del motor, equipo de adquisición de datos, transductores, dispositivos de acondicionamiento de señal, cableado y alimentaciones necesarias.

La actividad se encuadra en las temáticas **Técnicas de Aprendizaje y Diseño de Materiales Didácticos**.

Los alumnos implicados en esta actividad han estado integrados en la asignatura Tracción Eléctrica (6º Curso). El número de alumnos de dicha asignatura para el curso 98/99 fue de 14, por lo que no han surgido los problemas de masificación de otras asignaturas.

Con ella se han pretendido conseguir los siguientes objetivos didácticos:

- Mejorar el proceso de aprendizaje en el área de accionamientos de corriente continua y adquisición de datos.
- Familiarizar a los alumnos con el trabajo de laboratorio, el manejo de instrumentos de medida y transductores.
- Involucrar a los alumnos en la tarea de diseñar la práctica. Aunque se favoreció la participación de todos, dado el número de alumnos se escogieron dos de ellos para trabajar más activamente en la puesta en marcha de la actividad.

## CONTENIDOS QUE DESARROLLA

La actividad se estructuró en seis fases. El inicio de una fase presupone el final de la anterior. El contenido de cada una se muestra a continuación:

### Fase 1

Consiste en la definición del módulo simulador del vehículo eléctrico. Incluye básicamente el motor de tracción, alimentación en corriente continua, carga del motor, sistema de regulación y protecciones. La figura 1 representa esquemáticamente el módulo simulador.

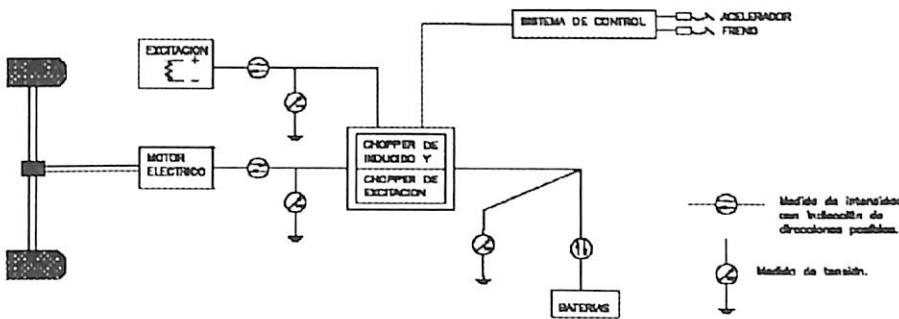


figura 1. Esquema de bloques del módulo simulador del vehículo eléctrico

Por otro lado se establecen las características técnicas que debe cumplir el equipo de adquisición de datos, junto con la de los distintos transductores, dispositivos de acondicionamiento, cableado y alimentaciones necesarias, así como el estudio de implantación en el módulo de prácticas.

Simultáneamente se confecciona un programa informático para tratamiento de datos, obtención de las magnitudes a deducir a partir del balance de potencias, así como del conjunto de gráficas que mejor representen el fenómeno analizado.

#### Fase 2

Consiste en la instalación, prueba y ajuste del equipo.

#### Fase 3

Se estudian las medidas y balances energéticos obtenidos, se destacan las enseñanzas adquiridas en el proceso, y se extraen las conclusiones más relevantes.

#### Fase 4

Como resultado del trabajo desarrollado en las fases anteriores se diseña una práctica de laboratorio. Se incluye la confección del correspondiente manual de la misma, así como de una encuesta cuyo objetivo será su evaluación por parte del alumnado.

#### Fase 5

Consiste en la realización de la práctica en el laboratorio. Inicialmente se pretendía que se realizara por los alumnos de las asignaturas Tracción Eléctrica (6º Curso) y Cálculo y Construcción de Máquinas Eléctricas (5º Curso). Falta de tiempo y recursos hicieron que sólo se aplicara a Tracción Eléctrica.

#### Fase 6

Finalmente se pasa la encuesta a los alumnos implicados y se redacta la memoria final de la innovación.

## METODOLOGÍA Y ACTIVIDADES

Al inicio de la actividad se organizó un equipo de trabajo compuesto por los profesores implicados y dos alumnos colaboradores matriculados en la asignatura Tracción Eléctrica. A continuación se detallan las actividades que se llevaron a cabo en cada fase, y las decisiones tomadas.

### Fase 1

En esta fase el grupo de trabajo definió los equipos a emplear en el módulo simulador, y realizó un programa de adquisición de datos y otro de tratamiento de los mismos (balance de potencias) y presentación de resultados. Para ello, y dado el escaso presupuesto, se optó por utilizar en lo posible los medios disponibles en el laboratorio.

Dada la facilidad para su control se escogió como motor del vehículo eléctrico el de corriente continua con excitación independiente. Para hacerlo funcionar con carga se le acopló mecánicamente otra máquina similar de corriente continua que haría las veces de carga cuando el vehículo funcionara en tracción y de motor cuando funcionara en frenado. Las características de ambas máquinas de corriente continua son: Potencia nominal: 40 kW, Tensión nominal: 24 V, Intensidad nominal: 5 A, Intensidad nominal de excitación: 2 A.

Para el control de la velocidad se optó por emplear un reóstato en el circuito de inducido del motor. No es la opción más eficiente desde el punto de vista del rendimiento, pero es la más simple y menos costosa. No obstante, no es descartable en un futuro disponer de otro sistema más avanzado, como el troceador. Dicho reóstato se emplea por tanto para acelerar el vehículo.

La alimentación del equipo, para hacer el montaje más realista, se decidió que fuese mediante baterías autónomas. Dadas las características del motor se escogieron dos baterías de 12 V, 17 Ah, que en serie alimentarían al motor a tensión nominal. Dado el uso educativo, dichas baterías fueron escogidas de modo que incorporan válvulas que evitan su explosión.

Una vez definidos los equipos se vio la posibilidad de simular los siguientes modos de funcionamiento:

- Arranque
- Funcionamiento motor (tracción)
- Frenado reostático
- Frenado regenerativo

Conviene en este punto aclarar que a pesar de que en el frenado el motor del vehículo eléctrico funciona como generador, se mantendrá en todo el artículo la denominación motor.

En relación al proceso de medida, se definieron en primer lugar las medidas que debían ser leídas por la tarjeta de adquisición de datos, y que permitieran completar el balance de potencia. Estas son las siguientes:

- Tensión en bornas de la alimentación mediante baterías
- Tensión en bornas del motor
- Intensidad absorbida el motor (en caso de ser cedida sería negativa)
- Intensidad cedida por la batería (en caso de ser absorbida sería negativa)
- Velocidad de giro

Además de las medidas anteriores el balance de potencias para el funcionamiento en

tracción exigía disponer de la característica mecánica par resistente-velocidad de la carga acoplada al motor, que simula la resistencia mecánica del vehículo eléctrico. Para ello se diseñó un ensayo para obtenerla. Igualmente el balance de potencias para el funcionamiento en freno requería disponer de la característica mecánica par motor-velocidad de la carga acoplada al motor. En esta ocasión la carga funciona como motor y el motor como carga.

Para capturar dichas magnitudes se concibió inicialmente el empleo de transductores con aislamiento galvánico entre el proceso y la tarjeta de adquisición. Así para la tensión se diseñaron optoacopladores lineales (figura 2). Para la intensidad se emplearon sensores Hall y para la velocidad convertidores velocidad-frecuencia mediante infrarrojos, disponibles en el laboratorio.

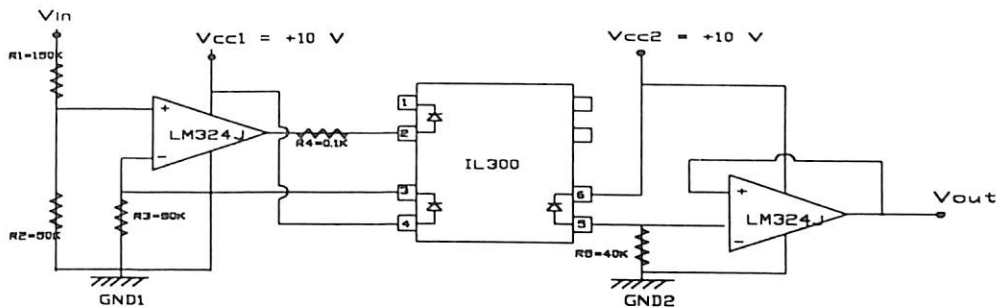


figura 2. Esquema eléctrico del optoacoplador lineal para la medida de tensión

En cuanto a la tarjeta de adquisición de datos, se empleó una AT-MIO-16E10 de National Instruments, por estar disponible en el laboratorio del Departamento.

La figura 3 muestra como queda el diseño del módulo simulador, donde se incluyen los transductores indicados, así como aparatos de medida para la lectura directa.

Una vez completado el diseño, uno de los dos alumnos colaboradores expuso a los demás alumnos implicados las características del mismo.

En relación al programa de adquisición y tratamiento de datos, y presentación de resultados, se utilizaron dos herramientas.

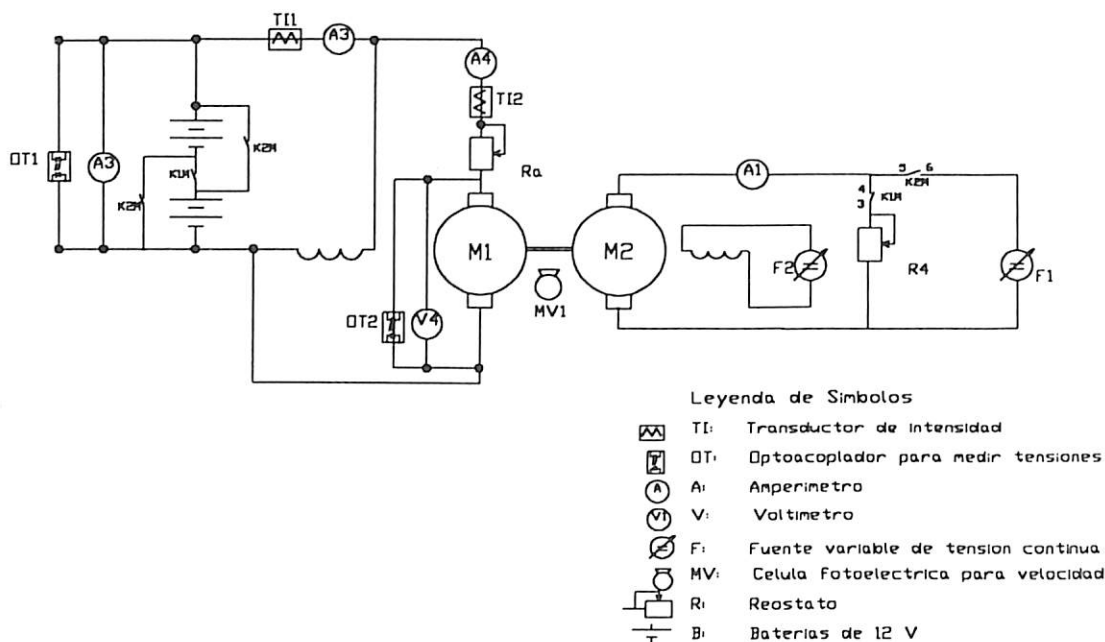


Figura 3. Esquema completo del montaje realizado

Para la adquisición de datos se empleó la herramienta LabVIEW, disponible en el laboratorio, y de la que se tenía experiencia previa por haber sido empleada en un proyecto de innovación anterior (CASAL y otros, 1998). La figura 4 muestra una de las pantallas del programa realizado.

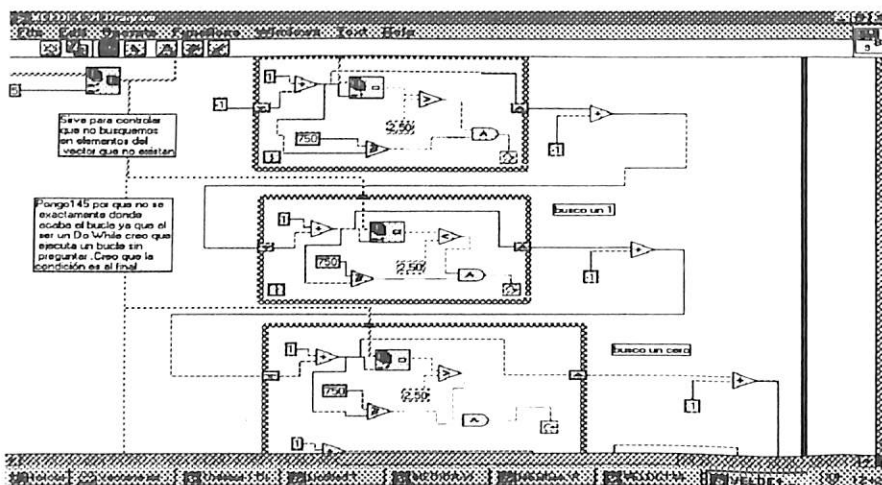


Figura 4. Programa de adquisición de datos en LabVIEW. Ejemplo de una de las pantallas

Para el tratamiento y presentación de resultados se empleó MATLAB, una herramienta específicamente diseñada para tratamiento numérico, y muy sencilla de manejar. Los aspectos abarcados con esta herramienta tanto en funcionamiento tipo tractor como en tipo frenado son los siguientes:

*Funcionamiento en tracción*

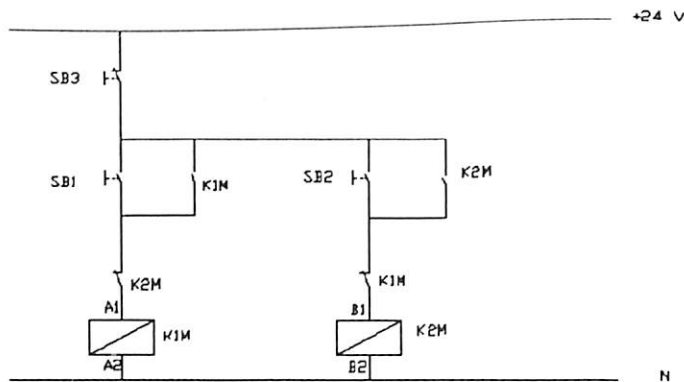
- Representación de la potencia útil del motor en función de la posición del reóstato de arranque ( $R_a$  en figura 3).
- Representación del rendimiento en función de la posición del reóstato de arranque
- Representación de las pérdidas joule totales en función de la posición del reóstato de arranque
- Representación de las pérdidas en el hierro y adicionales en función de la posición del reóstato de arranque

*Funcionamiento en frenado*

- Representación de la potencia cedida por el motor (funcionando como generador) en función de la posición del reóstato de arranque
- Representación del rendimiento del motor en función de la posición del reóstato de arranque
- Representación del rendimiento global del frenado (potencia absorbida por las baterías/potencia mecánica en el eje del motor) en función de la posición del reóstato de arranque
- Representación de las pérdidas joule totales en función de la posición del reóstato de arranque
- Representación de pérdidas en el hierro y adicionales del motor en función de la posición del reóstato de arranque

En cuanto a la automatización del proceso se barajó la posibilidad de emplear autómatas programables que arrancaran a la vez el proceso y el sistema de adquisición. Dada la envergadura de la tarea a realizar se propuso posponerla para futuras mejoras.

Para cambiar de tracción a frenado, así como para conmutar las baterías de serie a paralelo (esto se justificará más adelante) se diseñó el circuito de mando de la figura 5. Pulsando SB1 se excita la bobina del contactor K1M, las baterías se disponen en serie y se conecta el reóstato R4 (figura 3). Pulsando SB2 se excita la bobina del contactor K2M, las baterías se conectan en paralelo y la fuente F2 alimenta la máquina M2. La rama de R4 queda abierta. SB3 es el pulsador de paro.



*figura 5. Esquema de mando correspondiente al módulo imulador del vehículo eléctrico*

Por último el otro alumno colaborador expuso a los demás alumnos las bases del lenguaje LabVIEW, el programa realizado para la adquisición de medidas en el módulo, y el programa realizado en MATLAB para el cálculo del balance de potencias y la presentación de resultados.

Con la exposición de los alumnos colaboradores al resto de alumnos se pretendía por un lado mantenerles informados del progreso de la actividad, y por otro hacerles partícipes desde el principio de los objetivos que se pretendían alcanzar. Se ha comprobado en el Departamento por experiencia de otros proyectos de innovación pedagógica que esta metodología progresiva de acercamiento al problema es más receptiva por parte del alumno, ya que tiene oportunidad de aportar nuevas ideas y soluciones en las fases iniciales de diseño y elaboración de la actividad, y además va asimilando conocimientos de un modo paulatino.

## Fase 2

En esta fase los dos alumnos colaboradores realizaron el montaje del módulo de simulación y los correspondientes ajustes y pruebas. Las figuras 6 y 7 muestran sendas fotografías del montaje realizado. Esta es la fase en la que se encontraron más dificultades, por su carácter experimental, lo que conllevó ciertas modificaciones del diseño original. Las más importantes fueron las siguientes:

- En el proceso de adquisición de señal, debido a las vibraciones de las máquinas, la continuidad eléctrica en el cableado sufría interrupciones. Esto se solucionó situando la bancada sobre una plataforma elástica. Igualmente las interferencias fueron eliminadas mediante tratamiento de la señal.
- Se comprobó también que el convertidor velocidad-frecuencia convertía la velocidad de giro a una frecuencia relativamente pequeña (del orden de 25 Hz), por lo que no es válido para medir aceleraciones elevadas (p.e. arranques o paradas).



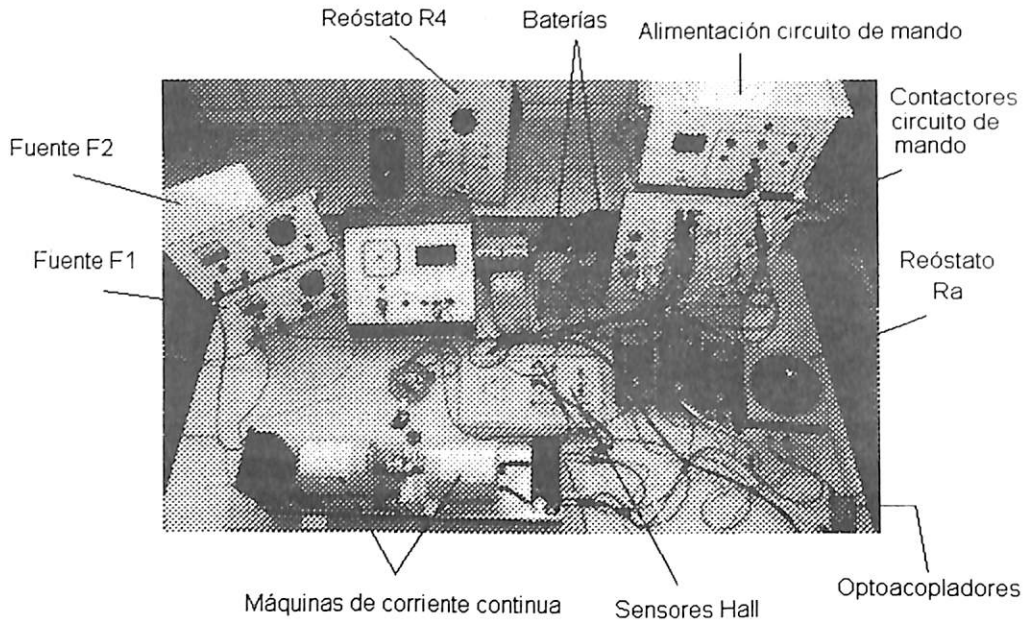
- No se conseguía el frenado regenerativo a las velocidades admisibles por las máquinas de corriente continua, por lo que hubo que poner en paralelo las dos baterías durante dicho funcionamiento. De este modo la tensión en las baterías era menor que la tensión en bornas del motor en funcionamiento generador.
- Había que tener especial cuidado también en la carga de las baterías. Una carga excesiva aumentaría la tensión en bornas en vacío, y haría más difícil simular el frenado regenerativo, por igual motivo que en el punto anterior.
- En el frenado regenerativo sólo se pudo determinar un punto de la característica motora de la máquina acoplada al motor (M2 en figura 3), debido a que el rango de par mecánico en frenado regenerativo es más estrecho que en tracción, y el dispositivo medidor de par no tenía la suficiente resolución para distinguir un punto de otro. Esto hizo que no se pudieran representar las curvas previstas en 3.1.

Todas las dificultades anteriores hicieron que el tiempo dedicado a esta fase fuera mayor del esperado, retrasando la puesta en práctica de las siguientes.

Indicar por último que, a pesar del tiempo empleado en esta etapa de ajuste, se consideró provechoso por servir para la mejora de la destreza experimental de los alumnos, difícilmente adquirible en las prácticas de asignaturas con más alumnos matriculados. Hizo ver también la importancia de la validación experimental en cualquier diseño de tipo industrial, y la necesidad de dedicar esfuerzos a la preparación de prototipos.



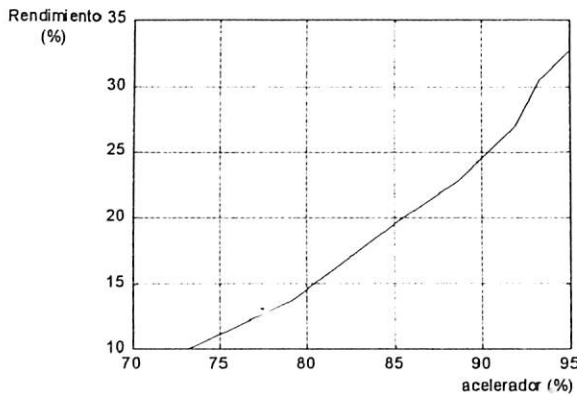
*Figura 6. Foto de conjunto del montaje realizado*



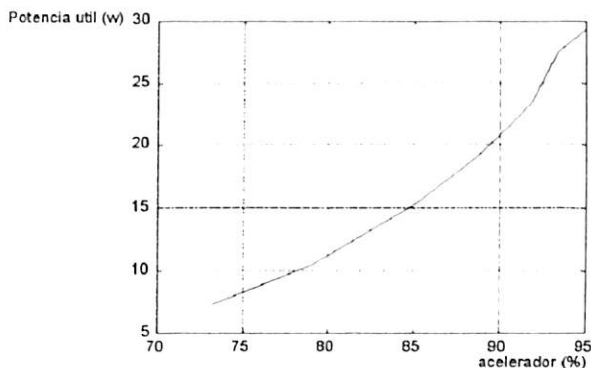
*Figura 7. Foto de detalle del módulo simulador*

**Fase 3**

En esta fase se analizaron los resultados obtenidos en el funcionamiento en tracción y frenado. Como ejemplo de los mismos se muestran las figuras 8 y 8.



*igura 8. Curva de rendimiento del motor en función de la aceleración*



*figura 9. Curva de potencia útil del motor en función de la aceleración*

Se destacan las siguientes conclusiones:

- El módulo es capaz de reproducir el comportamiento de un vehículo eléctrico que circula por una pendiente que ofrece una característica resistente fija, tanto en tracción como en frenado.
- El módulo no permite capturar un transitorio de arranque o parada debido a las características del transductor de velocidad.
- El rendimiento de la máquina de corriente continua es bajo (como máximo el 35% a máxima velocidad), debido por un lado a las características de la máquina empleada (resistencia de inducido elevada) y por otro al empleo de regulación de velocidad mediante reóstato.
- Con el diseño adoptado y las características de las máquinas, en el frenado regenerativo la corriente absorbida por las baterías resulta ser relativamente pequeña. Relacionado con lo anterior, el rendimiento global del frenado regenerativo (potencia eléctrica absorbida por las baterías/potencia mecánica en el eje) es pequeño, ya que la excitación absorbe la intensidad de la propia máquina, restando intensidad que podría cederse a las baterías.

#### Fase 4

Fruto del trabajo realizado se diseñó una práctica de laboratorio que debería realizar el resto de los alumnos (Casal y otros, 1999). Para ello el grupo de trabajo se centró en dos modos de funcionamiento: funcionamiento en tracción o motor y funcionamiento en frenado regenerativo, ambos con variación lenta de velocidad.

La tarea de los alumnos consistía en analizar ambos modos de funcionamiento. En el funcionamiento motor se fijaba una carga mecánica (equivalente a una pendiente fija en el trazado del vehículo eléctrico) y se hacía girar el motor entre dos velocidades mediante el reóstato  $R_a$  (figura 3), que simula el acelerador del vehículo. Simultáneamente se realizaba la adquisición de datos. Para ambas velocidades extremas los alumnos debían anotar los valores de las magnitudes indicadas en la fase 1.

En el funcionamiento en frenado regenerativo sólo se puede simular un punto, por la dificultad en obtener la característica motora de la máquina M2 (figura 3). En este caso se fija la pendiente descendente (tensión de las fuentes F1 y F2) y se hace variar el reóstato  $R_a$  hasta un valor de intensidad cedida por la máquina de continua de 0,1 A. Se miden entonces las mismas magnitudes que el caso anterior.

Además del trabajo en laboratorio, los alumnos debían rellenar un cuestionario, donde se les pedía obtener, a partir de las medidas realizadas y las características de las máquinas, algunos parámetros de interés para el funcionamiento de un vehículo eléctrico, como la velocidad máxima y mínima y curva de par resistente en el funcionamiento motor.

Por último se elaboró una encuesta de control con el objetivo del conocer la opinión de los alumnos acerca del desarrollo y realización de la actividad. Las preguntas que se incluyeron son las siguientes:

- Anota tu impresión global de la práctica y lo que más te ha llamado la atención
- Indica lo que te ha parecido menos interesante
- Indica alguna mejora que podría introducirse en el futuro (horario, manual, exposición teórica, contenido y objetivos de la práctica, etc.)
- Indica algo que podría suprimirse de la práctica
- Anota las mayores dificultades encontradas en la realización de la práctica
- ¿Piensas que hubiese sido más interesante realizar el montaje los propios alumnos?

#### Fase 5

En esta fase los alumnos de la asignatura Tracción Eléctrica realizaron la práctica en el laboratorio. Aunque en un principio se pensó en el montaje de dos puestos de prácticas, finalmente se montó sólo uno por limitaciones en las máquinas de corriente continua disponibles.

La duración de la práctica fue aproximadamente de 90 minutos, y se estructuró como sigue:

- Explicación por parte del profesor de la tarea a realizar, recordando las bases teóricas (conocidas por los alumnos en la fase 1).
- Realización de la simulación en funcionamiento como motor.
- Ejecución en un ordenador del programa de tratamiento y presentación de resultados.
- Análisis de los resultados obtenidos.
- Realización de la simulación en el funcionamiento como generador.
- Ejecución en el ordenador del programa de tratamiento y presentación de resultados.
- Análisis de los resultados obtenidos.

## Fase 6

En la última fase se pasó la encuesta a los alumnos implicados. El resultado de la encuesta es el siguiente:

- La gran mayoría de los encuestados piensa que lo más interesante fue el proceso de adquisición de datos con LabVIEW.
- Aunque la actividad se desarrolló en varias sesiones, incluyéndose en las mismas todos los aspectos que se iban a tratar en el laboratorio, algunos alumnos opinan que se podría haber profundizado más en áreas menos conocidas por ellos, como por ejemplo el lenguaje LabVIEW.
- Por último los alumnos hubieran deseado montar por ellos mismos la práctica.

## CONCLUSIONES

Se relacionan a continuación las conclusiones más relevantes como consecuencia del desarrollo de la actividad.

- Se ha diseñado un módulo de simulación de vehículos eléctricos, basado en dos máquinas de corriente continua que permiten simular diferentes comportamientos del accionamiento: arranque, tracción, frenado, parada.
- Basándose en dicho módulo se ha diseñado una nueva práctica titulada **Simulación de un vehículo eléctrico en el laboratorio. Balance de potencias**, así como su correspondiente manual. Esta práctica pasa a formar parte del temario de prácticas de la asignatura Tracción Eléctrica de 6º Curso de Ingeniero Industrial especialidad Electricidad.
- Del proceso de ajuste del equipo y análisis de resultados se han detectado algunas deficiencias y propuesto mejoras para futuras ediciones de la práctica. Algunas de las mejoras son: incluir el uso de autómatas programables para la automatización del proceso y disponer de la curva característica motora de la máquina M2 (figura 3).
- De las conclusiones obtenidas de la encuesta en la fase 6 se pueden plantear mejoras en el desarrollo de la actividad. Éstas pueden ser las siguientes:
  - Dado el interés mostrado por el proceso de adquisición de datos y en particular por el lenguaje LabVIEW se podría introducir previamente a la práctica otra práctica que profundizara en dicho lenguaje.
  - Igualmente, para profundizar en el balance de potencia, los alumnos podrían realizar el programa de tratamiento de los datos y presentación de resultados.
  - Por último sería tarea del alumno el montaje de la práctica. Esto trae consigo un incremento del tiempo de laboratorio empleado por el profesorado, ya que, por las características de la práctica, es necesaria la presencia de un experto para revisar el montaje, y así evitar riesgos para los alumnos y posibles daños en los equipos.

Destacar como conclusión final el carácter innovador de la actividad en el área de máquinas eléctricas, por enfocarse no sólo al comportamiento de una máquina en particular, sino de dicha máquina integrada en un sistema o accionamiento eléctrico. Asimismo, resaltar el enfoque pluridisciplinar de la actividad, donde se requiere el conocimiento de diversas áreas de la ingeniería: electrónica, adquisición de datos, programación, máquinas eléctricas, esquemas eléctricos.

## BIBLIOGRAFÍA

CASAL, M.; BURGOS, M.; CRUZ, P.; GONZÁLEZ, A.G. y IZQUIERDO, C. (1998). *Monitorización y control del arranque de una máquina de corriente continua*, Universidad de Sevilla. Revista de Enseñanza Universitaria, Edición extraordinaria 1998.

CASAL, M.; CRUZ, P.; BURGOS, M.; GONZÁLEZ, A.G., MAZA, JOSÉ M. y IZQUIERDO, C. (1999). *Práctica de laboratorio. Simulación de un vehículo eléctrico. Balance de potencias*, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Sevilla.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de D. José Manuel Rodríguez Martín y D. Enríquez Gutiérrez Calderón, alumnos de la asignatura Tracción Eléctrica (6º Curso de Ingenieros Industriales, Especialidad Electricidad), que formaron parte del grupo de trabajo creado para poner en marcha la actividad, así como a D. José Luis Domínguez Reina, técnico de apoyo a la docencia adscrito al Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Sevilla.

Igualmente los autores desean expresar su agradecimiento al Instituto de Ciencias de la Educación de la Universidad de Sevilla por la financiación de este trabajo mediante la concesión de una ayuda en el marco de la Convocatoria de Ayudas a la Docencia Universitaria para el curso 1998/99.