

INTEGRACIÓN DE LA ELECTRÓNICA DE POTENCIA EN EL LABORATORIO DE TRACCIÓN ELÉCTRICA

Pedro Luis Cruz Romero
Manuel Casal Gómez-Camirero
Manuel Burgos Payán
José María Maza Ortega
Antonio de la Villa Jaén
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 cuyo propósito es el diseño de un freno dinamométrico de pequeña potencia con posibilidad de control desde un ordenador. Este equipo, una vez calibrado, se empleará como carga en el futuro diseño de un banco de ensayos de máquinas eléctricas aplicadas a la tracción. Se describe la tarea realizada conjuntamente por el equipo de profesores y alumnos en las fases de diseño del freno, realización del programa de control, implementación y pruebas. Con esta actividad se pretende por un lado dotar al laboratorio de tracción de un componente del futuro banco de tracción eléctrica, y por otro lado permitir el ejercicio indagatorio y exploratorio por parte del alumno, resaltando sobre todo el trabajo experimental.

ABSTRACT

An innovative educational experience in the electrical machines area with the aim of designing a small power computer-controlled dynamometer load is presented. This equipment, once it is calibrated, will be used as load for the future design of a traction-oriented electrical machines test bench. It is described the task developed by teachers and students team throughout different stages: brake design, control software development, implementation and tests. With this activity it has been aimed at, by one hand, providing the laboratory with a component of future electric traction test bench, and, by the other, developing the exploratory task by the students, focusing mainly on the experimental work.

INTRODUCCIÓN

El ensayo de máquinas eléctricas consiste en realizar medidas de magnitudes eléctricas (tensión, corriente, potencia) y mecánicas (velocidad, par) y otras (temperatura, ruido) mientras se las hace funcionar a diferentes niveles (vacío, carga parcial, carga nominal, carga constante, carga variable) y ciclos (permanente, intermitente, etc.) de carga, y obtener posteriormente parámetros importantes del funcionamiento del motor: rendimiento, grado de envejecimiento del aislamiento, parámetros del modelo matemático, etc.

En el campo de la tracción eléctrica es especialmente importante poder realizar ensayos en régimen intermitente con carga variable, ya que éste es el perfil de carga característico de este tipo de

aplicaciones. Para entender esto basta pensar en el servicio que ofrece un vehículo circulando en ciudad. La primera etapa es el arranque, durante el cual el par resistente que ofrece el firme al giro de las ruedas es pequeño (suponiendo suelo horizontal). A medida que el vehículo va adquiriendo velocidad el motor está sometido a un par resistente creciente hasta alcanzar una velocidad máxima, punto donde el motor está dando la máxima potencia para dicha travesía. Si es necesario frenar (semáforo, fin del trayecto) se puede aplicar un freno de tipo mecánico o eléctrico. A esto hay que añadir la posibilidad de cambio de pendiente en el trazado, lo que haría variar el par resistente de una manera brusca.

Para ensayar máquinas eléctricas dedicadas a tracción es por tanto necesario disponer de un equipo que haga el papel del trazado, ofreciendo más o menos resistencia según esté simulando una pendiente ascendente o descendente. En el banco de ensayos este papel lo realiza el freno dinamométrico, llamado así porque tiene capacidad para medir la fuerza de frenado, en forma de par. Existen en el mercado diversos tipos de frenos dinamométricos: de corrientes parásitas, de polvo magnético, etc, que, mediante una señal de control, permiten ajustar el par de frenado al valor deseado.

En el laboratorio de tracción no sólo se ensaya el equipo motor, sino otros componentes, como la cadena de tracción, y el equipo propulsor, compuesto por una serie de baterías. Es por ello que disponer de un freno dinamométrico calibrado permite la realización de numerosos ensayos en los que se analicen el comportamiento de los diferentes componentes del vehículo.

DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD

La actividad cuyos resultados se presentan en esta comunicación pretende realizar el diseño de un freno dinamométrico controlado por ordenador, con el fin de conseguir un control preciso del par resistente, de manera que se pueda obtener en tiempo real un cuadro de marcha (velocidad del vehículo frente al tiempo) similar al que tendría un vehículo real. Para ello bastaría con introducir en el programa de control que regula la carga del freno la curva par resistente/tiempo deseada.

Existe en el laboratorio de Tracción Eléctrica un precedente en el diseño de bancos de ensayo del equipo motor de un vehículo eléctrico (Casal y otros, 2000). Sin embargo, el equipo desarrollado no explota las posibilidades de la electrónica de potencia para conseguir un control más sencillo y efectivo de la carga accionada.

Debido a que los contenidos involucrados en el desarrollo de la actividad se estudian en cursos previos, se vio conveniente incluirla en el temario de la asignatura **Tracción Eléctrica** (6º Curso Ingeniería Industrial, Plan 64). Dado el pequeño número de alumnos que cursan dicha asignatura fue posible hacerlos partícipes a todos del trabajo a desarrollar. Este hecho es de especial relevancia, ya que esta asignatura, de carácter opcional, se ha concebido desde un principio con el propósito de proveer al alumno con un conjunto de habilidades actitudinales pluridisciplinares, como el trabajo en equipo, la discusión en clase, la presentación en público, el análisis y valoración de resultados experimentales, la búsqueda de fuentes de información, etc., sin dejar de lado obviamente los propios contenidos conceptuales que aborda. Para conseguir esto se vio la necesidad de modificar el criterio evaluador, evitando la indudable presión que ejerce sobre los alumnos el propio contenido de la asignatura cuando se evalúa su conocimiento mediante pruebas escritas. Es por ello que la evaluación comprende todas las actividades que realiza el alumno: presencia y participación activa en clase, realización de ejercicios, trabajos, prácticas de laboratorio, etc.

La actividad se ha realizado en varias fases, que se describen brevemente a continuación:

- **Fase 0: Selección tipo de freno a emplear.** Para ello se tuvieron en cuenta las disponibilidades del laboratorio. Esta fase fue realizada por el profesorado.
- **Fase 1: Análisis teórico.** Planteamiento de las ecuaciones que permiten determinar los límites de funcionamiento del freno, así como la relación entre el par resistente y la señal de control.
- **Fase 2: Ensayo del troceador.** Permite caracterizar el equipo de electrónica de potencia (en concreto un troceador) empleado para regular el par resistente.
- **Fase 3: Programa de control.** Realización del programa de control del freno.
- **Fase 4: Montaje en el laboratorio.** Realización del montaje de los equipos en el laboratorio y puesta en marcha.

FASE 0: SELECCIÓN TIPO DE FRENO A EMPLEAR

En esta fase, de carácter previo, se decidió, por parte de los profesores involucrados, el tipo de freno a emplear. Para ello se tuvo en cuenta el equipamiento disponible en el laboratorio. Tal como se indicó previamente, existe ya una práctica de laboratorio que trata de simular el funcionamiento de un vehículo eléctrico. Dicha práctica está implementada en una bancada con máquinas de corriente continua de 50 W. Debido a la existencia de dos máquinas, se decidió emplear una de ellas como motor y la otra como generador que alimenta una resistencia variable R_f , formando un freno reostático (figura 1). La variación del par resistente se consigue por variación de la tensión U_o que alimenta la resistencia. Esto se logra con un equipo de electrónica de potencia llamado troceador. Mediante la señal de control U_c se regula la tensión de salida del troceador y por tanto la potencia disipada en la resistencia.

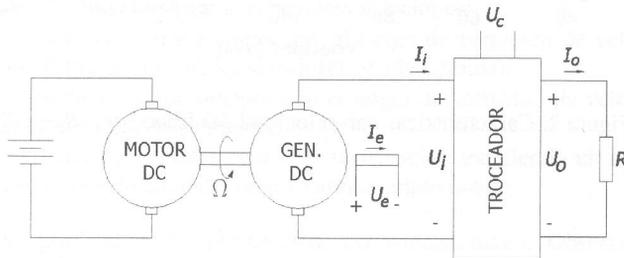


Figura 1. Esquema eléctrico del freno reostático empleado

La tensión de entrada U_i al troceador puede variar de dos maneras: modificando el valor de la velocidad de giro Ω del motor y/o variando la corriente de excitación I_e . Se supondrá en lo que sigue que la excitación es constante.

FASE 1: ANÁLISIS TEÓRICO

Esta fase consistió en la obtención de las curvas límites par resistente/velocidad que el freno es capaz de suministrar. Además se debía dimensionar el valor de R_f . El equipo que realizó este trabajo se compuso de dos alumnos que, una vez finalizado, lo presentaron al resto de la clase. Se resumen a continuación los principales resultados.

Debido al tipo de troceador empleado la relación entre las tensiones de salida U_o y de entrada U_i viene dada por

$$U_o = \alpha U_i - B - R_f I_o \quad (1)$$

siendo α un valor menor que 1 que se regula mediante la tensión de control U_c , B una constante y R_f una resistencia ficticia cuya potencia disipada representa las pérdidas en el troceador. Es posible con esta relación y haciendo balance de potencia obtener la relación entre el par de frenado y la velocidad Ω para distintos valores de α . Los límites de funcionamiento del freno son la velocidad nominal del generador y la intensidad máxima que puede dar, que puede coincidir con la intensidad nominal del generador o con un valor inferior condicionado por las características del troceador.

El valor de R_f se obtiene de modo que exista un compromiso entre par elevado a alta y baja velocidad. Las figuras 2 y 3 muestran las curvas límites de funcionamiento y su variación con α para dos valores distintos de R_f . Las características del equipo empleado se mostrarán más adelante.

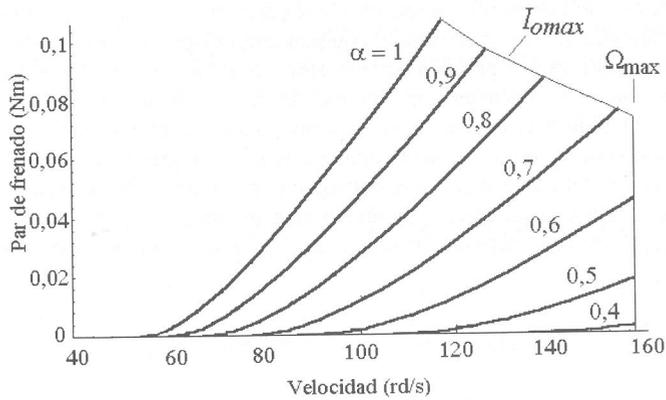


Figura 2. Características par-velocidad del freno para $R_f = 0,87 \Omega$

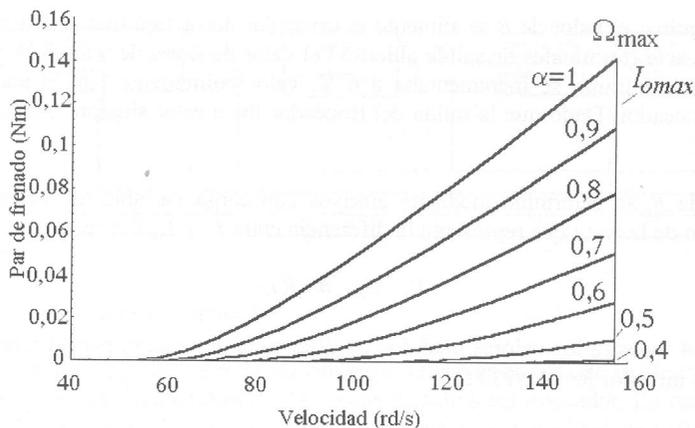


Figura 3. Características par-velocidad del freno para $R_l = 2,5 \Omega$

El valor de R_l de la figura 2 es aquel para el cual se alcanza el máximo par a una velocidad $\Omega = 0,75 \Omega_{\max}$ y $\alpha=1$. Si se determina la resistencia para la que se alcanza el máximo par a la máxima velocidad (velocidad nominal) y $\alpha=1$ se obtienen las curvas de la figura 3. Comparando ambas figuras se observa que reduciendo la resistencia R_l se obtienen valores mayores de par a velocidades inferiores a la nominal. Sin embargo el par máximo alcanzado es siempre menor que para la velocidad nominal, y va disminuyendo conforme aumenta la velocidad, llegando a reducirse a la mitad en el punto nominal.

Estos aspectos fueron propuestos por el grupo de dos alumnos en la clase de presentación de resultados de esta fase, discutiéndose algunas posibles soluciones:

- Emplear la resistencia menor siempre que el rango de variación de velocidad a la que va a trabajar el motor que accione el freno es inferior a la nominal.
- Emplear la resistencia mayor siempre que el rango de variación de velocidad del motor esté localizado en la zona alta de velocidad.
- Tener la posibilidad de disponer de ambas resistencias, existiendo un relé que conmutase de una a otra cuando la velocidad del motor variase ampliamente.

En aras de la simplicidad se optó por escoger la resistencia mayor. Obsérvese que a velocidades inferiores el par conseguido con dicha resistencia es sólo ligeramente inferior al obtenido con la de menor valor.

FASE 2: ENSAYO DEL TROCEADOR

En esta fase se caracterizó el funcionamiento del troceador. Fue realizada por un alumno, y el trabajo tuvo un carácter eminentemente práctico. Una vez completado, fue presentado por dicho alumno.

Los objetivos de esta fase fueron:

- Determinar el valor de B y R_l
- Determinar la relación entre la tensión de control U_c y α

Para determinar el valor de B se alimentó el troceador desde una fuente de tensión variable. Se observó que en vacío (terminales de salida abiertos) el valor de B era de unos 3 V, y que conectando una carga de valor mínimo se incrementaba a 6 V, valor coincidente con el suministrado por el fabricante del troceador. Dado que la salida del troceador iba a estar siempre conectada a R_l se tomó este último valor.

El valor de R_l se determinó mediante ensayos con carga variable, obteniendo por regresión lineal la ecuación de la recta que representa la diferencia entre U_i y U_o frente a I_o :

$$U_i - U_o = B + R_l I_o$$

La figura 4 muestra los valores medidos de diferencia de tensión para diferentes corrientes de carga. Se obtuvo un valor $R_l = 1,3139 \Omega$.

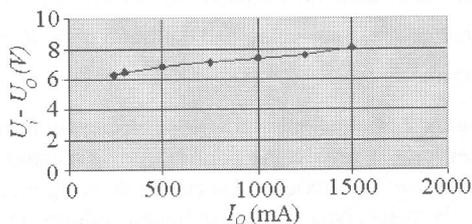


Figura 4. Valores medidos de diferencia entre tensión de entrada y salida del troceador para diferentes niveles de carga.

Para obtener la relación entre α y U_c se realizaron varios ensayos con diferentes tensiones de entrada al troceador y diferentes valores de U_c . Se observó que la tensión de salida era máxima ($\alpha = 1$) para $U_c \approx (U_i / 2)$ y se anulaba ($U_o = 0$) para $U_c = 0$, existiendo una variación que podía suponerse lineal entre ambas magnitudes. De la ecuación (1) puede verse que para $U_o = 0$ se tiene que $\alpha = B/U_i$. La relación entre U_c y α viene entonces dada por

$$U_c = \frac{U_i}{2(U_i - B)} (\alpha U_i - B)$$

FASE 3: PROGRAMA DE CONTROL

Esta fase es la que requiere más dedicación. Afortunadamente fue realizada por dos alumnos que mostraron gran interés debido a una cierta similitud con sus proyectos fin de carrera. Una vez completada se presentó conjuntamente con el grupo que realizó la fase 4.

El objetivo de esta fase fue realizar el control del freno, de tal manera que para una consigna de par el programa genere la tensión de consigna U_c adecuada para que, a la velocidad de giro impuesta, el par de freno coincida con el de consigna. Para ello se empleó una tarjeta de adquisición de datos NATIONAL INSTRUMENTS y el lenguaje de programación LabView 5.0, de la misma empresa. La figura 5 muestra el esquema de control propuesto.

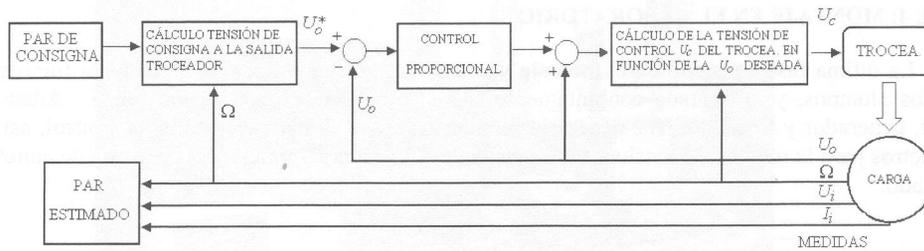


Figura 5. Esquema de control empleado

A este esquema se llegó después de realizar varios ensayos en los que se observó que la variable que más influía en la bondad del control era la tensión de salida del troceador. En consecuencia ésta se tomó como variable de control. Dado el par de consigna y la velocidad se calcula la tensión de consigna a la salida del troceador y se compara con la medida. El error se amplifica en un sencillo control proporcional, cuya salida permite determinar la tensión de control. El programa tiene como salida la curva de par estimado, calculado gracias a las medidas de intensidad y tensión a la entrada del troceador. La figura 6 muestra la pantalla principal del programa.

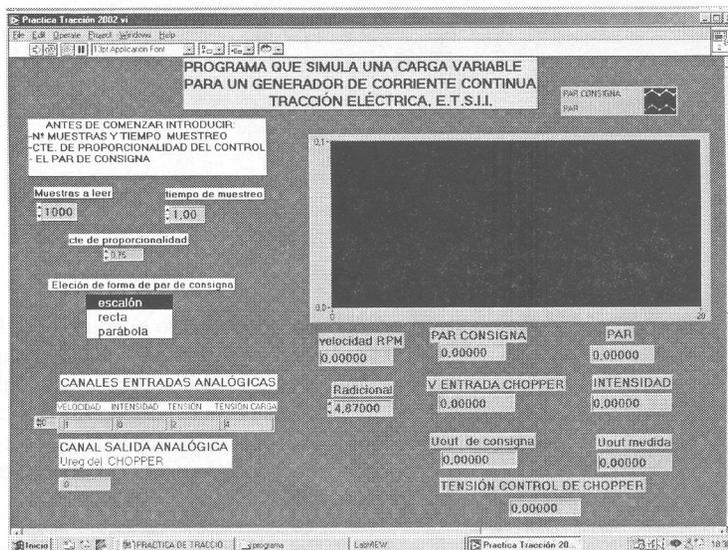


Figura 6. Pantalla principal del programa de control



FASE 4: MONTAJE EN EL LABORATORIO

La última fase consistió en el montaje y puesta en marcha del equipo. Esta tarea fue realizada por dos alumnos, y presentada conjuntamente con el programa en una sesión única. Además del motor, generador y troceador, fue necesario montar los sensores necesarios para el control, así como polímetros para la medida de tensiones e intensidades. La figura 7 muestra el esquema de conexiones detallado.

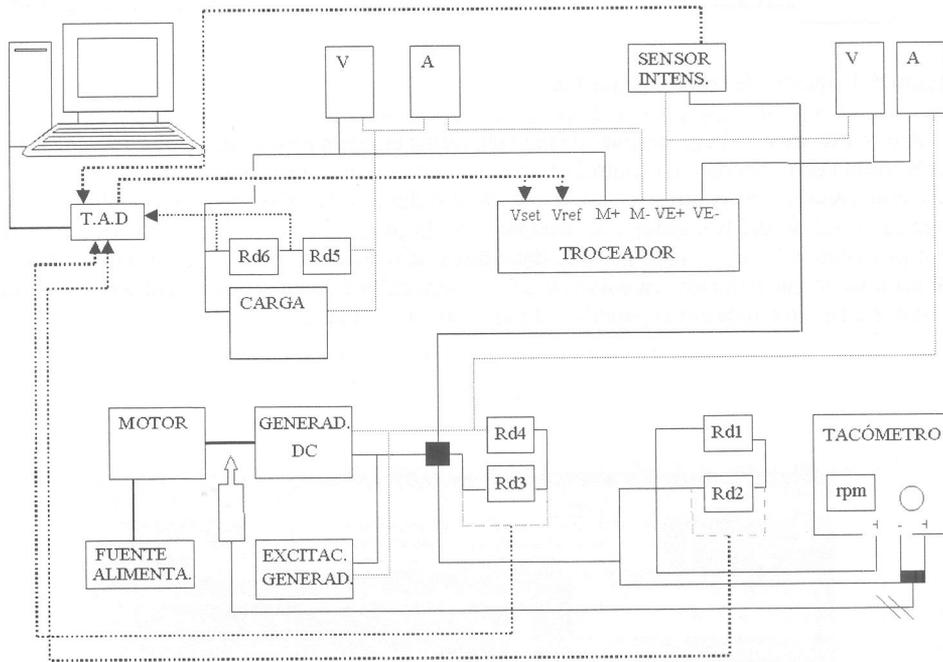


Figura 7. Esquema de conexiones del montaje realizado en el laboratorio

En las figuras 8 y 9 se muestra el aspecto final una vez montado el equipo. La figura 8 muestra una vista general en la que se aprecia a la izquierda el ordenador con la tarjeta de adquisición de datos (insertada en su interior), a la derecha el banco con el motor y generador, y en el centro el troceador, resistencia de carga, sensores y polímetros. La figura 9 muestra un detalle de la parte central, donde se destaca en primer plano los sensores de tensión (simples divisores de tensión), en un plano intermedio la resistencia de carga (reóstato variable) a la izquierda y el troceador a la derecha (encima de un disipador), y al fondo los polímetros y sensor de intensidad.

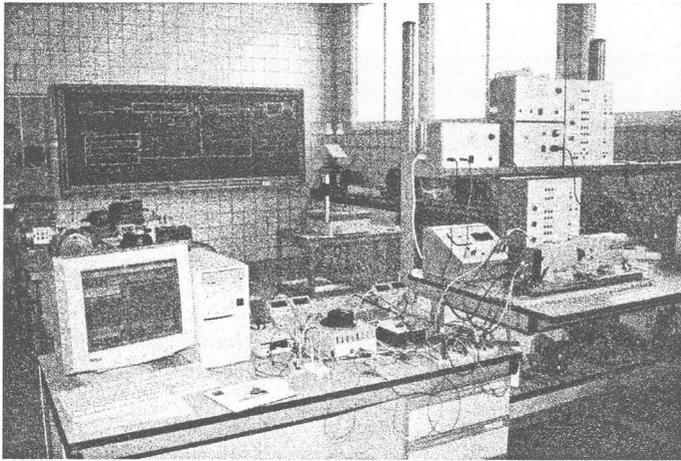


Figura 8. Vista de conjunto del montaje realizado

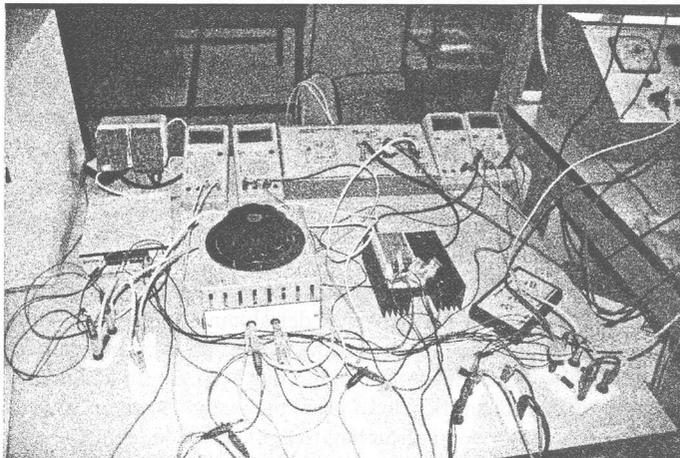


Figura 9. Detalle de la resistencia de carga (izquierda) y el troceador (derecha)

Una vez montado se probó el equipo manteniéndolo a velocidad constante e introduciendo un par de consigna variable en el tiempo. Se probaron tres tipos de curvas: escalón, lineal y parabólico. La figura 10 muestra los resultados. Puede observarse un error entre el par medido y el de consigna que es atribuible al sencillo control empleado (proporcional) y al modelo simplificado empleado para estimar la tensión de salida del troceador.

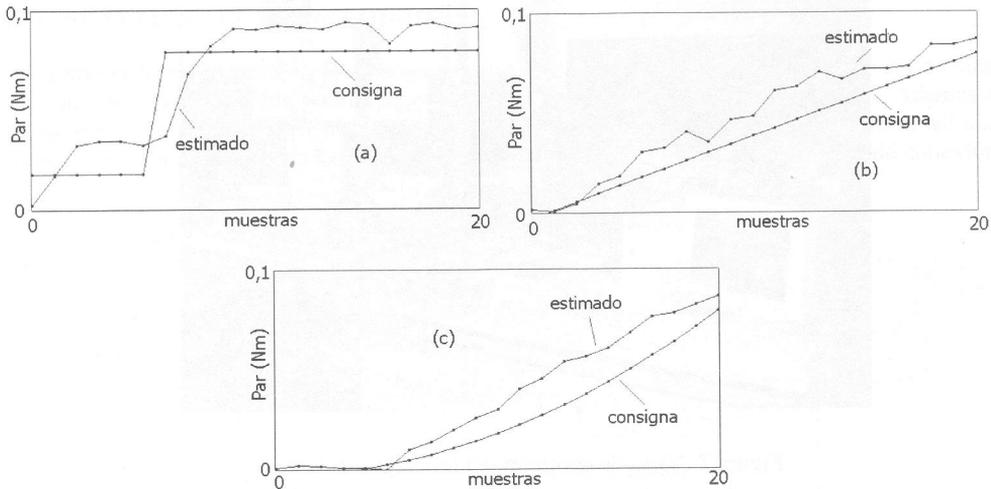


Figura 10. Par estimado y de consigna para tres tipos de curvas: (a) escalón, (b) lineal y (c) parabólica

Las principales características del motor y troceador son las siguientes:

- Motor de continua de 24 V, 50 kW, funcionando como generador
- Troceador de máxima tensión de entrada de 35 V y máxima corriente de salida 2,2 A

EVALUACIÓN

Tal como se indicó en el apartado 2 la asignatura en la que se ha desarrollado esta actividad está enfocada de modo que se fomente la participación del alumno mediante discusión, consultas en el aula, presentación de trabajos, de tal manera que se ha suprimido la prueba clásica del examen escrito u oral. Siguiendo esta línea se ha evaluado al alumno que realizó esta actividad en función de unos parámetros, algunos de difícil cuantificación, pero muy significativos a la hora de valorar el aprovechamiento académico: grado de implicación, tiempo dedicado, contribuciones originales en las discusiones y en el desarrollo de la tarea asignada, iniciativa propia, etc.

CONCLUSIONES

Se ha presentado una actividad de innovación en el aula de Tracción Eléctrica con el objetivo de diseñar, montar y poner en marcha un pequeño freno dinamométrico que servirá para el futuro banco de ensayo de máquinas eléctricas aplicadas a la tracción.

Debido a las limitaciones de tiempo y a la sencillez del control elegido la robustez y exactitud del equipo son aún limitadas. Sin embargo, dado el carácter académico de la actividad, los resultados conseguidos permiten visualizar ciertos aspectos de interés relativos al modelo de la máquina y al control: errores obtenidos al emplear un modelo lineal del generador, error en la salida debido al control proporcional, importancia de los límites de funcionamiento para la protección del generador y troceador. En futuras versiones del programa de control se añadirán nuevas posibilidades, tanto en la protección como en el control del equipo.

De la encuesta rellena por los alumnos, así como de las opiniones expresadas en las varias sesiones de puesta en común realizadas, éstos han mostrado una actitud favorable a la realización de actividades de esta naturaleza, no sólo en relación al trabajo intelectual desarrollado, sino también a la metodología empleada. Sin embargo, por parte de los profesores se ha echado de menos un poco más de iniciativa personal. Este déficit puede explicarse por la propia concepción del currículo docente universitario, basado en la unidireccionalidad de la comunicación profesor-alumno.

BIBLIOGRAFÍA

CASAL, M. y otros (2000). Simulación de un vehículo eléctrico en el laboratorio. Balance de potencias. **Actas de las 2^{as} Jornadas Andaluzas de Calidad en la Enseñanza Universitaria**, vol. I, pp. 463-76.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Vicerrectorado de Calidad y Nuevas Tecnologías 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 para la Innovación para el curso 2001/02.

Asimismo, agradecen la colaboración y el interés mostrado por los alumnos implicados en esta actividad: Ana Castañeda, Jesús Núñez, Ignacio Otero, Rafael Navas, Daniel Sánchez, Rafael Ruiz y Alicia Valverde.