

# Laboratorio Virtual para el Aprendizaje de Motores Asíncronos en Grados de Ingeniería

Pau Casals Torrens

**Title— Virtual Laboratory for Learning Asynchronous Motors in Engineering Degrees.**

**Abstract— Studies within the EHEA framework include the acquisition of skills such as the ability to learn autonomously, which requires students to devote much of their time to individual and group work to reinforce and further complement the knowledge acquired in the classroom. In order to consolidate the results obtained from classroom activities, lecturers must develop tools to encourage learning and facilitate the process of independent learning. The aim of this work is to present the use of virtual laboratories based on Easy Java Simulations to assist in the understanding and testing of electrical machines.**

**Index Terms— Easy Java Simulation (Ejs), electric machines, learning, simulation, virtual laboratory.**

## I. INTRODUCCION

LA convergencia y homologación de estudios dentro del Espacio Europeo de Educación Superior (EEES), ha originado la necesaria inclusión en los planes de estudio de criterios de aprendizaje basados en competencias genéricas y específicas, que habiliten al estudiante para el ejercicio de la profesión. Una de estas competencias o capacidades a desarrollar, es el aprendizaje autónomo mediante la resolución de ejercicios, problemas y el estudio de casos. Es decir, el estudiante ha de dedicar una gran parte de su tiempo (del orden del 50 % de los créditos ECTS) al trabajo personal y en grupo, para afianzar y completar la información recogida en las clases expositivas, participativas, prácticas de laboratorio, sesiones de problemas, proyectos con soporte del profesor, etc.

El aprendizaje autónomo en los Grados de Ingeniería, donde el componente práctico del proceso de aprendizaje es importante, requiere de medios innovadores que motiven y ayuden al estudiante a consolidar el resultado de su esfuerzo individual. Para ello son necesarias nuevas herramientas que complementen y refuercen las actividades de estudio en base a libros, notas, consultas en bibliotecas o mediante buscadores en Internet. Estas herramientas facilitadoras del aprendizaje autónomo deberían incluir la experimentación mediante laboratorios virtuales (simuladores) o laboratorios remotos, en entorno web o aplicación residente en ordenador personal.

Pau Casals Torrens es profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Av. Diagonal, 647. Barcelona E-08028 (España). Telef. +34 934016696, e-mails: [p.casals@upc.edu](mailto:p.casals@upc.edu)  
DOI (Digital Object Identifier) Pendiente

Con dicha finalidad, en este trabajo se presenta el uso de técnicas de simulación o laboratorios virtuales, aplicados al aprendizaje de las Máquinas Eléctricas, así como los primeros resultados de evaluación obtenidos, de estudiantes de Ingeniería Técnica Naval, dentro de un programa experimental aplicado en la Facultad de Náutica de Barcelona y cuyos objetivos básicamente se pueden resumir en dos:

- Potenciar el uso de la simulación como herramienta de estudio.
- Determinar que tipo de e-laboratorio permite ofrecer mejores resultados para comprender las clases teóricas y complementar las prácticas de laboratorio.

### A. Prácticas en Laboratorio Real o Simulado

Esta es una vieja controversia entre defensores de uno u otro modelo, de la cual hay sólidos argumentos a tener en cuenta de ambos puntos de vista [1], [2]. Las prácticas de laboratorio presenciales ayudan al futuro ingeniero a tener contacto con los equipos y materiales, que en un futuro tendrá que utilizar, le permiten enfrentarse a problemas imprevistos y a las incontroladas variables que la experimentación real ofrece; en contrapartida son medios costosos, requieren espacio y tienen limitaciones de disponibilidad de uso. Por su parte los laboratorios virtuales ofrecen la posibilidad de analizar una mayor variedad de casos, el estudio repetitivo de cada situación, son económicos, no presentan el riesgo de contacto eléctrico y no tienen limitaciones de tiempo para el usuario. El desarrollo de las tecnologías TICs (Tecnologías de la Información y la Comunicación) ha estimulado un creciente interés por el desarrollo y estandarización de plataformas de e-aprendizaje [3], [4], así como por contenidos asociados a los laboratorios virtuales y su amplio campo de aplicación, como los demuestra el creciente número de aplicaciones y publicaciones, incluidas específicas de máquinas asíncronas destinadas a educación, referenciadas en [5] - [8].

### B. Plataforma del Laboratorio Virtual

En la actualidad existe una amplia variedad de software y lenguajes de programación (LabView, MATLAB/Simulink, C, C++, Basic, Java, entre otros), que permiten desarrollar laboratorios virtuales con una elevada potencia de simulación, un alto grado de interactividad, capacidad multiusuario y la flexibilidad necesaria para comunicarse con los usuarios integrándose fácilmente en plataformas de e-aprendizaje.

Para nuestra aplicación hemos escogido el Java Ejs (Easy Java Simulations), ya que es una herramienta de software gratuita, diseñada para el desarrollo de laboratorios virtuales interactivos, dispone de elementos visuales parametrizables

e interactivos que permiten la rápida construcción de modelos y vistas del laboratorio virtual [9]. Una vez se está familiarizado con la plataforma Ejs, el desarrollo y validación de modelos conocidos, que incluyan figuras o partes en movimiento, puede realizarse en un tiempo estimado de entre 80 y 100 horas. Los parámetros de los modelos pueden reconfigurarse rápidamente, mediante la pantalla de entrada de datos, y como ventaja destacable de la plataforma, tanto para el desarrollador como para el usuario, es la disponibilidad de pantallas informativas, donde puede describirse teóricamente el modelo, incluir las ecuaciones aplicables y las instrucciones de uso del modelo. Estas pantallas se activan conjuntamente con la pantalla de ejecución del modelo, o pantalla activa, como se describirá más adelante.

La compilación en Java, de códigos de ejecución independiente, comúnmente llamados applets, permite que las aplicaciones puedan residir en la Web de nuestro centro universitario (plataforma Moodle de soporte a la docencia) o puedan ser descargadas y ejecutadas en el ordenador del usuario con el uso de JVM (Maquina Virtual de Java software de libre difusión) [10]. Adicionalmente existe la posibilidad de integrar modelos Matlab/Simulink en los modelos Ejs, mediante la aplicación Java Internet Matlab (Jim) [11], lo cual permite extender las capacidades de Ejs.

## II. METODOLOGÍA DOCENTE

La metodología a aplicar se caracteriza por:

- Implicación docente en el proceso de aprendizaje del alumno/a.
  - Participar en el desarrollo de laboratorios virtuales, como material docente que acompañe y facilite el aprendizaje en el aula/laboratorio y el autónomo.
  - Presentación y aplicación de estas herramientas en las clases teóricas de cursos con contenidos de Máquinas Eléctricas.
- Aportación de modelos de simulación como material de apoyo, en función del avance en el temario de la asignatura.
  - Aplicables a máquinas asíncronas.
  - Disponer de diferentes casos de análisis, con facilidad de actualización periódica.
- Dinamizar el estudio de casos y el aprendizaje activo.
  - Análisis de casos por parte del profesor, en forma colectiva en el ámbito de la clase.
  - Hacer más ágiles las presentaciones en clase y actuar como dinamizadoras de esta.
- Estimular el trabajo en equipo.
  - Análisis de casos por parte de estudiantes, en grupos pequeños vinculados a grupos de laboratorio, en el ámbito de la clase.
- Fomentar el aprendizaje autónomo.
  - Análisis de casos de forma autónoma por el estudiante, como asignación de trabajos individuales evaluables.

- Vinculación e integración dinámica del conocimiento teórico con el práctico.
- Reforzar las prácticas de laboratorio.
  - Preparación previa de preinformes individuales, evaluables, de las prácticas de laboratorio, con una dedicación estimada de dos horas semanales.
- Aprovechar los recursos audiovisuales multimedia actualmente disponibles en cualquier aula.

### Objetivos Pedagógicos.

- Crear laboratorios virtuales, como material docente que acompañe y facilite el aprendizaje;
- Facilitar la comprensión de los conceptos asociados.
- Motivar la experimentación y el análisis del funcionamiento de los motores de inducción, como paso previo a las prácticas presenciales.
- Disponer de herramientas que permitan desarrollar y evaluar competencias específicas y genéricas.

## III. MODELO: PARÁMETROS E INTERFASES DE OPERACIÓN

El laboratorio virtual que se presenta está enfocado al estudio de la máquina asíncrona como motor de inducción. Ha sido elaborado en Java Ejs, y puede ejecutarse desde esta plataforma o directamente como applet. Se ha creado como aplicación pensada para estudiantes de cursos iniciales de máquinas eléctricas.

Dispone de pantallas descriptivas, figuras 1, 2 y 3, donde se ha hecho una introducción al modelo, variables, ecuaciones, y se ha explicado como usarlo.

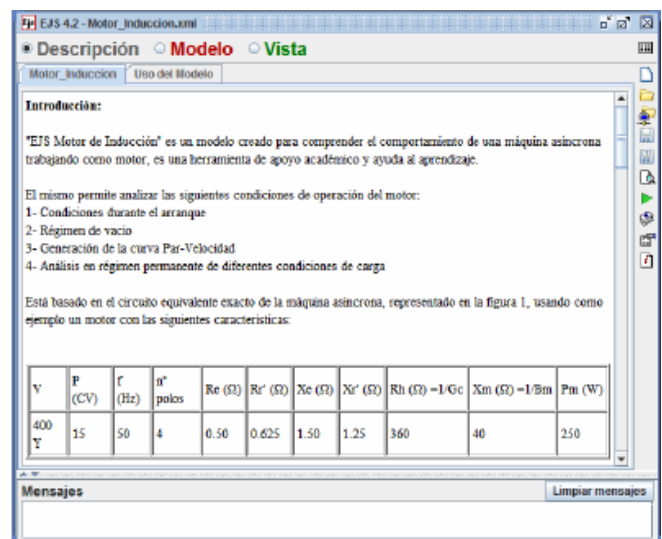


Fig. 1. Pantalla descriptiva, introducción del modelo

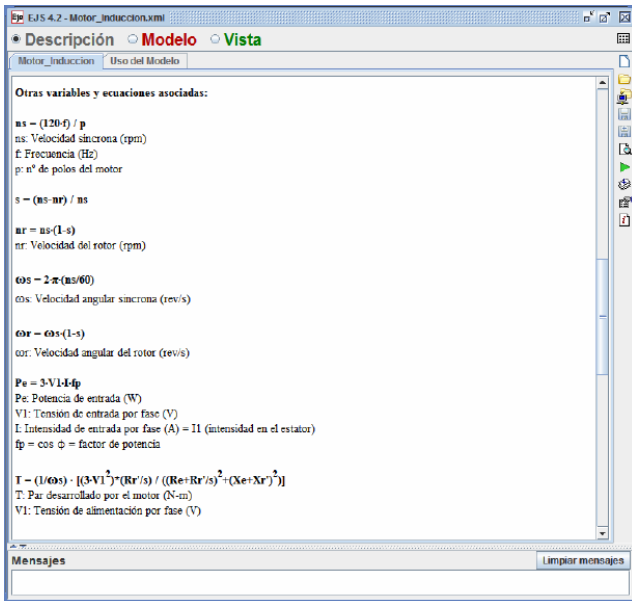


Fig. 2. Pantalla descriptiva, fórmulas del modelo

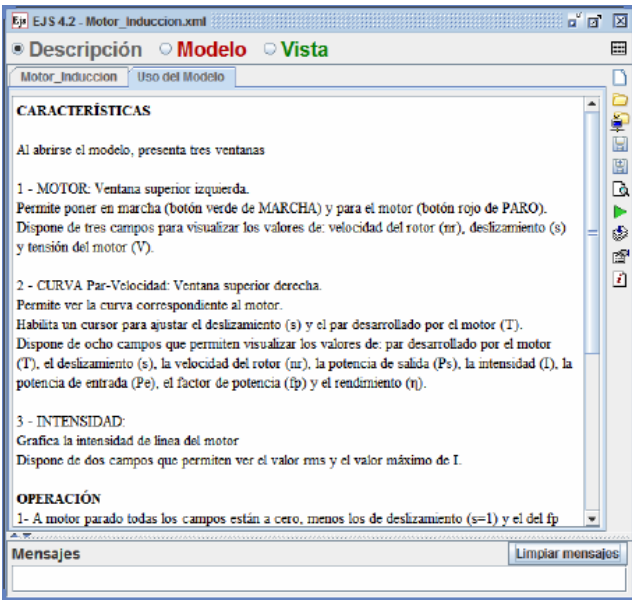


Fig. 3. Pantalla descriptiva, uso del modelo

El modelo utiliza el circuito equivalente de la máquina asíncrona, en condiciones de régimen permanente, Fig. 4, y su función es ayudar a analizar y comprender el funcionamiento de esta máquina trabajando como motor, sin tener que disponer de una instalación real.

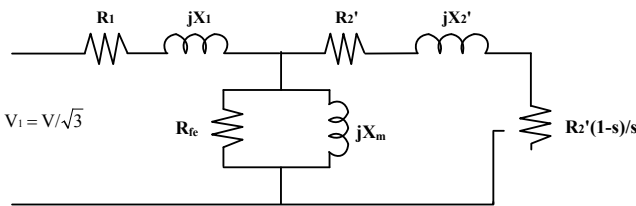


Fig. 4. Circuito equivalente por fase

**TABLA I**  
PARAMETROS UTILIZADOS EN EL MODELO DEL MOTOR

Parámetro	Variable	Unidades
Tensión de alimentación	V	V
Tensión de alimentación por fase – conexión estrella	V <sub>1</sub>	V
Frecuencia	f	Hz
Número de polos	p	-
Resistencia de estator	R <sub>1</sub>	Ω
Reactancia de fuga del estator	X <sub>1</sub>	Ω
Resistencia del rotor referida al estator	R <sub>2</sub> '	Ω
Reactancia de fuga del rotor, referida al estator	X <sub>2</sub> '	Ω
Deslizamiento	s	-
Resistencia de carga	R <sub>2</sub> '(1-s)/s	Ω
Resistencia que representa las pérdidas en el hierro	R <sub>fe</sub>	Ω
Reactancia que representa la magnetización del hierro	X <sub>m</sub>	Ω
Pérdidas mecánicas	P <sub>m</sub>	W

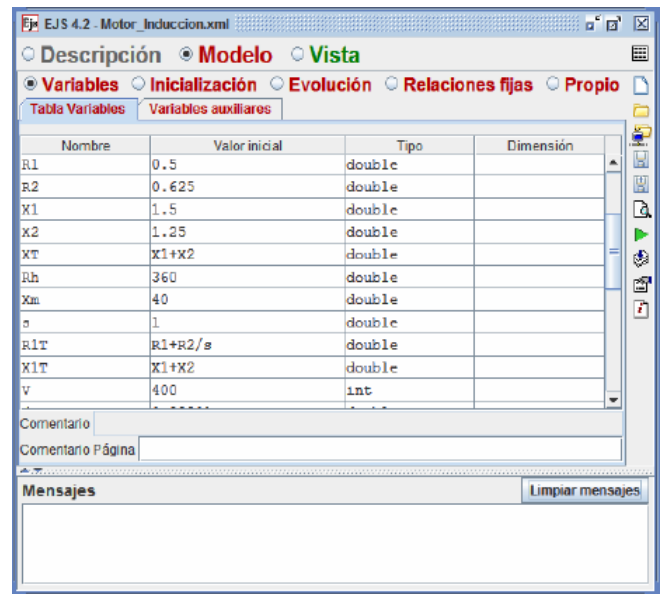


Fig. 5. Pantalla de entrada de datos

Los parámetros que definen el motor y sus condiciones de trabajo se indican en la tabla I.

Estos pueden ser introducidos mediante la pantalla de adquisición de datos del modelo, que tiene la plataforma de simulación, ver Fig. 5.

El funcionamiento del motor se simula mediante la ecuación de par desarrollado (1), donde V<sub>1</sub> es la tensión de alimentación por fase (V/√3) y ω<sub>s</sub> la velocidad angular de sincronismo.

$$T = \frac{1}{\omega_s} \cdot \left[ \frac{3 \cdot \left(\frac{R_2'}{s}\right) \cdot V_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2} \right] \text{ N.m} \quad (1)$$

El modelo construye tres ventanas, que permiten la interfase con el usuario, Fig. 6:

- Ventana de Marcha/Paro

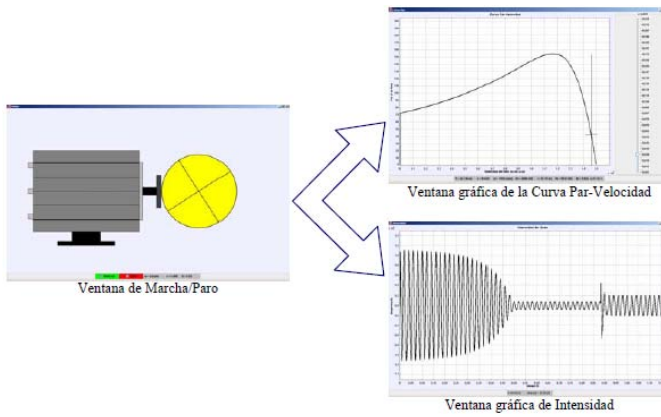


Fig. 6. Ventanas de interfaz con usuario

- Ventana gráfica de la Curva Par-Velocidad
- Ventana gráfica de Intensidad

Cada una de ellas aporta la información necesaria, que en conjunto, permite conocer en cada momento, las diferentes magnitudes de las variables de trabajo del motor:

- T: Par desarrollado (N·m)
- I: Intensidad de línea (rms y pico) (A)
- Pe: Potencia eléctrica de entrada (W)
- fp: Factor de potencia
- s: Deslizamiento
- $\omega_s$ : Velocidad angular síncrona de la máquina (rad/s)
- nr: Velocidad del rotor (rev/min)<sup>1</sup>
- Ps: Potencia mecánica de salida (W)
- $\eta$ : Eficiencia (%)

La ventana Marcha/Paro, como su nombre indica, es la que permite iniciar y parar la simulación (el motor).

La ventana gráfica de la Curva Par-Velocidad, es la herramienta fundamental de análisis de este modelo de laboratorio virtual y está compuesta de tres partes:

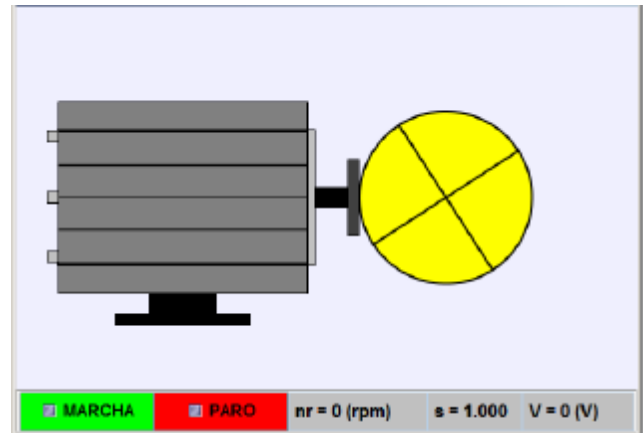
- Curva Par Velocidad
- Cursor para ajuste de deslizamiento, ajuste de carga, (s)
- Indicadores de medida de las variables de mayor interés.

La ventana gráfica de Intensidad permite visualizar, en cada momento de la simulación, las variaciones de la corriente consumida.

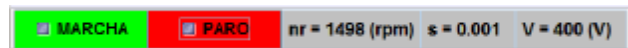
Las condiciones de operación del motor, que pueden analizarse con el modelo son:

- Arranque
- Régimen a máximo par
- Régimen permanente en carga

<sup>1</sup> A pesar de no ser una unidad del sistema SI, se ha considerado necesario incluir la velocidad en revoluciones por minuto (rev/min o rpm), ya que la práctica industrial: placas de motores, catálogos, equipos de medida, literatura especializada, etc. la utiliza habitualmente.



a. Motor parado



b. Motor en marcha sin carga

Fig. 7. Ventana de pulsadores de Marcha/Paro

### A. Arranque del Motor

El motor se arranca pulsando el interruptor de “Marcha”, Fig. 7, e inmediatamente se activan los indicadores de tensión de servicio, velocidad y deslizamiento para cualquier condición de carga.

Como primer paso de simulación y análisis se genera la curva par-velocidad, Fig. 8, con la información de esta ventana es posible conocer las diferentes magnitudes de trabajo del motor en el punto de arranque ( $s=1$ ), que corresponde a velocidad del rotor ( $n_r$ ) igual a cero.

El transitorio de corriente de línea que absorbe el motor, durante el arranque, puede visualizarse en la ventana grafica de intensidad de línea, Fig. 9, en la cual pueden leerse los valores de intensidad:

- I = valor efectivo (rms)
- $I_{m\acute{a}x}(t)$  = valor pico

Estos valores se obtienen de las ecuaciones (2) y (3), y corresponden a los valores que tiene el motor en cada momento o condición de operación: arranque, vacío o después de una modificación de carga (par resistente). Los mismos se actualizan permanentemente, la gráfica se desplaza como en un osciloscopio.

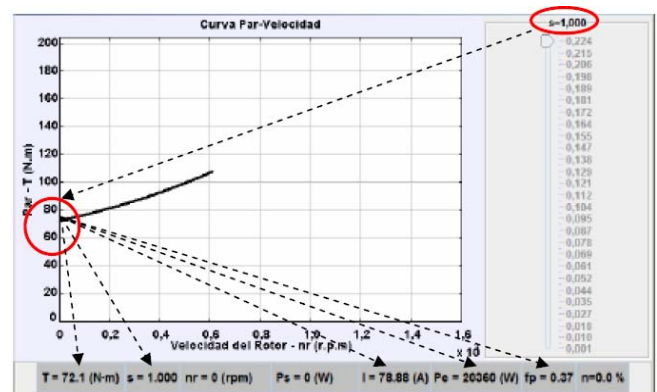


Fig. 8. Gráfica “Curva Par-Velocidad”. Punto de arranque



$$I = \frac{V/\sqrt{3}}{Z_{eq}} = \frac{V/\sqrt{3}}{(R_1 + jX_1) + (Z_{fe} \parallel Z_2')} \quad A \quad (2)$$

$$I_{m\acute{a}x} = I\sqrt{2} \quad A \quad (3)$$

donde  $Z_{fe} \parallel Z_2'$  es igual a la impedancia resultante del paralelo entre la impedancia del hierro y la del rotor:

$$Z_{fe} = \frac{1}{Y_{fe}} = 1 / \left( \frac{1}{R_{fe}} + \frac{1}{X_m} \right) \quad \Omega \quad (4)$$

$$Z_2' = \left[ R_2' + \frac{R_2'}{s} \cdot (1-s) + jX_2' \right] = \left( \frac{R_2'}{s} + jX_2' \right) \quad \Omega \quad (5)$$

**B. Régimen a Máximo Par**

Una vez superado el transitorio de arranque y finalizada la construcción de la curva, se habilita el cursor de ajuste de s (deslizamiento) y con un clic sobre la figura se representa el valor de  $T_{max}$ , para  $s_{max}$ , ecuación (6); así como el resto de valores de las diferentes variables, para estas condiciones de trabajo del motor, Fig. 10.

$$s_{max} = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1'^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (6)$$

Este punto es crítico ya que divide la curva en dos zonas, siendo la parte derecha la zona de trabajo estable, con valores de s que pueden obtenerse con el desplazamiento del cursor ( $0 < s < s_{max}$ ). El análisis de este punto va acompañado de la respectiva representación de los valores instantáneos de corriente, en la ventana gráfica de intensidad.

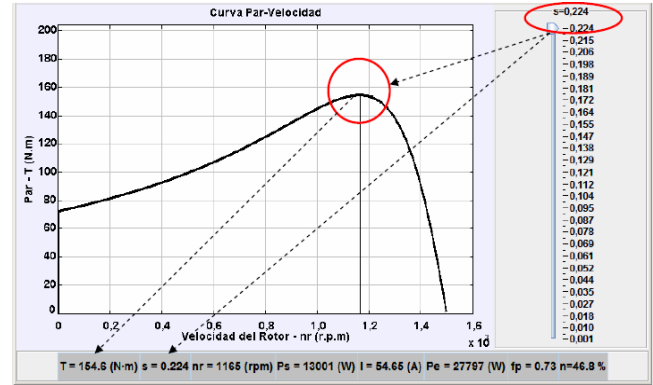


Fig. 10. Gráfica “Curva Par-Velocidad”. Máximo par

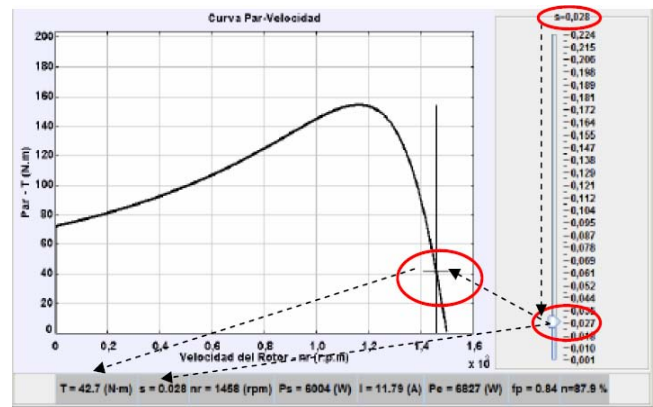


Fig. 11. Gráfica “Curva Par-Velocidad”. Punto de carga

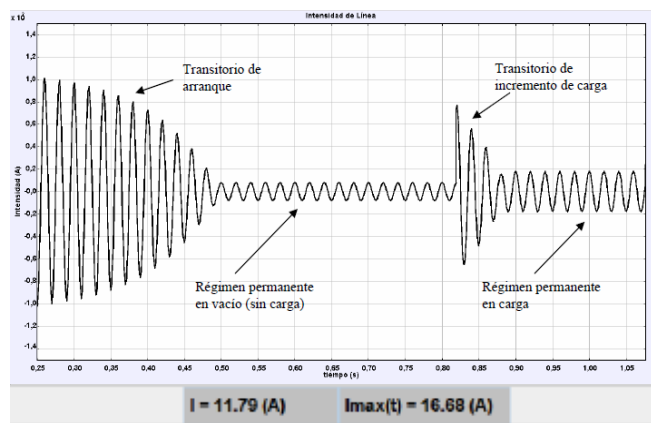


Fig. 9. Gráfica “Intensidad de línea”

**C. Régimen Permanente en Carga**

El cursor de deslizamiento puede desplazarse para simular cualquier punto de carga entre máximo par y vacío. En la figura 11 se ha seleccionado un punto determinado de carga ( $s=0,028$ ) y se obtienen nuevamente los valores de las diferentes variables de trabajo del motor. Como en los anteriores casos, este punto de análisis va acompañado de la representación de los valores instantáneos de corriente, aportados por la ventana gráfica de intensidad, figura 9.

**IV. EVALUACIÓN Y RESULTADOS**

Este apartado presenta la evaluación realizada y los resultados obtenidos.

El modelo de laboratorio virtual presentado, ha sido usado por estudiantes de la asignatura Máquinas e Instalaciones Eléctricas, que imparte el Departamento de Ingeniería Eléctrica, de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), en la Facultad de Náutica Barcelona. Dicha asignatura es obligatoria en los estudios de Ingeniería Técnica Naval y la misma tiene prácticas en laboratorio real.

TABLA II  
VALORACIÓN DE ESTUDIANTES

Actividad Laboratorio Virtual	1	2	3	4	5	Average	%>3
Facilidad de acceso	0	4	6	12	2	3.5	58.3
No requiere tener software especial	0	4	9	6	5	3.5	45.8
Facilidad de uso	0	2	10	7	5	3.6	50.0
Claridad de comandos/ventanas	0	3	8	8	5	3.6	54.2
Ayuda para el aprendizaje	1	1	7	12	3	3.6	62.5
<b>Actividad Laboratorio Real</b>							
Instrucciones preparatorias	0	6	6	10	2	3.3	50.0
Lecciones y preinformes en Web	0	5	5	12	2	3.5	58.3
Practicas presenciales	0	0	4	9	11	4.3	83.3
Informe final	0	1	9	11	3	3.7	58.3
Trabajo en equipo	0	3	5	10	6	3.8	66.7
Opinión general	0	1	5	16	2	3.8	75.0

Finalizado el curso, los estudiantes evaluaron la actividad práctica de laboratorio virtual y laboratorio presencial, respondiendo, de forma anónima y voluntaria, un cuestionario previamente explicado, y con una escala de cinco niveles por respuesta (1: Nada útil o adecuado, 2: Poco útil o adecuado, 3: Neutro; 4: Útil o adecuado, 5: Muy útil o adecuado). La participación fue del 52,2 % (24 alumnos de 46), el cuestionario y los resultados se muestran en la Tabla II.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la plataforma y el modelo virtual propuesto ha tenido una valoración media entre 3,5/3,6 puntos de un total de 5. En la mayoría de aspectos valorados, la consideración de útil o muy útil es igual o superior al 50%, alcanzando el 62,5% al opinar sobre la “ayuda para el aprendizaje”. El aspecto de “no requiere tener software especial”, con 45,8%, puede ser indicativo de una menor importancia respecto al tipo de software que se utilice. Es una variable a considerar más ampliamente en futuras evaluaciones y en el desarrollo del proyecto.

En la valoración de los aspectos vinculados a la actividad de prácticas en laboratorio real, la consideración de útil o muy útil, prevalece en todos los casos, y es igual o superior al 50%. Otros resultados a destacar, son la valoración del aspecto “prácticas presenciales” que supera el 83% y la valoración del aspecto “opinión general”, sobre la actividad en laboratorio real, que alcanza el 75%.

## V. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos a partir de la opinión de los estudiantes, ofrecen una visión positiva sobre las potencialidades de este plan experimental para apoyar el aprendizaje autónomo, desde la Web académica de nuestra Facultad, facilitando la comprensión de los conceptos teóricos.

El contexto de estas primeras valoraciones sugiere que este tipo de recurso requiere una mayor explotación, lo cual nos anima a continuar con el esfuerzo de ampliar la oferta de laboratorios virtuales en nuestro campo, y evolucionar hacia laboratorios remotos puede significar una mejora importante.

La disponibilidad de este tipo de herramienta permite y facilita asignar trabajos en casa, el estudio de casos de máquinas asíncronas de diferente nivel de complejidad y trabajos previos a las prácticas de laboratorio. Detectándose en clase más interés (más preguntas) de los alumnos con mayor motivación por los temas eléctricos.

Se detecta que la experimentación virtual, previa a la práctica real, favorece la comprensión de esta. Como lo reflejan el mayor conocimiento de causa en las respuestas o justificaciones dadas en los informes de laboratorio y relacionadas con el comportamiento real de las máquinas observado en laboratorio.

La elevada y positiva valoración de las prácticas presenciales, reales, nos advierte que los laboratorios virtuales o remotos, pueden ser una herramienta complementaria pero no sustitutiva de aquellas, al menos en las asignaturas e ingenierías consideradas en este estudio. Poniendo en evidencia que no puede establecerse una tendencia general, a favor de los laboratorios virtuales o remotos, en perjuicio de los laboratorios reales.

## REFERENCIAS

- [1] J.E. Corter, J.V. Nickerson, S.K. Esche, and C. Chassapis, “Remote versus Hands-On Labs: A Comparative Study,” in *Proc. 34th Am. Soc. for Eng. Education (ASEE)/IEEE Frontiers in Education Conf., 2004.*, Savannah, GA, 2004, pp: 17-21.
- [2] C. A. Cañizares and Z. T. Faur, “Advantages and disadvantages of using various computer tools in electrical engineering courses,” *IEEE Trans. Educ.*, vol. 40, no. 3, pp. 166-171, Aug. 1997.
- [3] M. Llamas-Nistal, M. Caeiro-Rodríguez, and M. Castro, “Use of E-Learning Functionalities and Standards: The Spanish Case” *IEEE Trans. Educ.*, vol. PP, 2010.
- [4] R. Pastor, E. Tovar, I. Plaza, M. Castro, M. Llamas, F. Arcega, G. Díaz, F. Falcone, F. Jurado, J. A. Sánchez, F. Mur y J. Carpio, “Los recursos tecnológicos para la teleformación en España: Comparativa e implantación.” *IEEE-RITA*, vol. 4, no. 1, pp. 27–36, Feb. 2009.
- [5] L. Gomes, and S. Bogosyan, “Current Trends in Remote Laboratories,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 12, pp. 4744-4756, Dec. 2009.
- [6] C.S. Tzafestas, N. Palaiologou, and Manthos Alifragis, “Virtual and Remote Robotic Laboratory: Comparative Experimental Evaluation,” *IEEE Trans. Educ.*, vol. 49, no. 3, pp. 360-369, Aug. 2006.
- [7] S. Ayasun y C. O. Nwankpa, “Induction Motor Tests Using MATLAB/Simulink and Their Integration into Undergraduate Electric Machinery Courses”, *IEEE Trans. On Education*, vol. 48, pp. 37-46, Febrero 2005.
- [8] J. Fraile, “Estudio del comportamiento de la máquina asíncrona utilizando MATLAB®/Simulink,” *IEEE-RITA*, vol. 2, no. 1, pp 9-18, Mayo 2007.
- [9] F. Esquembre. “Easy Java Simulations,” [Online]. Disponible <http://www.um.es/fem/EjsWiki/> Última consulta Mar. 2011.
- [10] A. Ferrero, S. Salicone, C. Bonora, and M. Parmigiani, “ReMLab: A Java-Based remote, didactic measurement laboratory,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 52, no. 3, pp. 710–715, Jun. 2003.
- [11] G. Farias, F. Esquembre, J. Sanchez, S. Dormido, “Laboratorios virtuales remotos usando easy java simulations y simulink,” in *Proc. XXVII Jornadas de Automática*, Almería, España, 2006, pp. 926 – 933.



**Pau Casals-Torrens** es Doctor en Ingeniería Industrial por la Universidad Politécnica de Cataluña. 16 años de experiencia industrial en laboratorios de ensayos y pruebas de alta tensión. Desde 2001 es profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la UPC, coordinador del laboratorio de máquinas eléctricas de la FNB-UPC. Combina sus actividades docentes y de investigación con la participación en proyectos con empresas del sector eléctrico.