

UNA EXPERIENCIA DE INNOVACIÓN DOCENTE EN LA ENSEÑANZA DEL ELECTROMAGNETISMO.

P. Lambea*, A. Larrén*, J.S. Artal, J. Mur**, A. Usón** y J. Letosa****

* Estudiantes de la EUITI de Zaragoza.

** Departamento de Ingeniería Eléctrica.

Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial. Universidad de Zaragoza.

Campus Tecnológico del Actur.

María de Luna nº 3. Edificio C, 'Torres Quevedo'.

50018. Zaragoza.

Tlfnº: +34 976 762589. Fax: +34 976 762226.

jsartal@unizar.es, joako@unizar.es, auson@unizar.es y jletosa@unizar.es.

1. RESUMEN

En esta comunicación presentamos una experiencia didáctica realizada al auspicio del Programa de Innovación Docente de la Universidad de Zaragoza (convocatoria 2002). En el caso que nos ocupa se ha dirigido a alumnos de primer curso de la titulación de Ingeniería Técnica Industrial (EUITI) y en la enseñanza de la Electricidad y Magnetismo, aunque la idea es extrapolable a otras asignaturas, cursos y titulaciones.

La actividad consistió en organizar un concurso entre los estudiantes de la asignatura donde se seleccionó un trabajo de curso. Como incentivo para aumentar la motivación se comunicó que el proyecto elegido se propondría para su exposición en este congreso de innovación docente y los alumnos responsables habrían de presentarlo en él.

El trabajo seleccionado resultó ser un prototipo de máquina de Van de Graaff que alcanza tensiones del orden de cientos de kV, resultando seguro por la escasa carga acumulada en su electrodo de salida. Dicho dispositivo constituye un recurso muy valioso en la enseñanza de la electrostática.

Queremos aprovechar esta ocasión para dar algunas pinceladas sobre la historia de la máquina de Van de Graaff, sus aplicaciones científicas e industriales y sus posibilidades didácticas, así como unas referencias básicas que permitan a los profesores interesados investigar sus posibilidades docentes. Para ampliar información, sobre los aspectos tratados en este documento, invitamos a los lectores interesados a ponerse en contacto con nosotros.

2. INTRODUCCIÓN

Para mantener "viva" una asignatura universitaria básica, de cualquier titulación, es necesario, a nuestro entender, realizar una serie de actividades en torno a ella introduciendo de forma continuada novedades respecto a los cursos anteriores. Para ello, es crucial que en cada curso el profesor se embarque en algún nuevo proyecto para la mejora de la docencia en la materia que imparte. Para que los trabajos en esta línea se materialicen en resultados significativos es necesario que un núcleo de profesores se mantenga durante

un largo periodo de tiempo al cargo de la impartición en la misma materia. Aunque somos conscientes que este planteamiento lleva en ocasiones a una “fossilización” de la materia que se imparte, cuando el profesor se limita a repetir lo preparado en el primer año, que debe evitarse, también reconocemos la inestimable mejora continua de la docencia que proviene de la experiencia acumulada de los profesores que la imparten. Consideramos que esta experiencia y la visión global que se alcanza es más importante en las materias básicas de cada titulación, como en nuestro caso son electromagnetismo, física, y matemáticas, entre otras. En ellas no basta el dominio de los contenidos de la materia sino que es necesario trabajar el planteamiento adecuado para motivar al estudiante y para mostrarle la utilidad e importancia de estas materias en el contexto de su carrera. Por ello, expresamos nuestras reservas respecto a los modelos de planificación que proponen la rotación de los profesores en la docencia de las asignaturas de un departamento Universitario.

La experiencia de algunos de los autores de esta comunicación se extiende a más de diez años dedicados a la docencia del electromagnetismo en un curso inicial para ingenieros. De ella hemos concluido que cualquier cambio que se introduzca en la docencia ha de ser lento y gradual, ya que los grandes cambios introducen mejoras pero también nuevos inconvenientes, siendo en general traumáticos y viendo, en la mayor parte de las ocasiones, sus expectativas defraudadas por causas de muy diversa índole.

Con estas cautelas se han realizado distintas acciones encaminadas a la mejora de la docencia en la asignatura que van desde las relativamente frecuentes, como la adaptación de una asignatura a un nuevo plan de estudios y en su mantenimiento en los años sucesivos, a otras más específicas que detallaremos más adelante. Estas tareas de adaptación y mantenimiento han implicado una revisión con detalle del programa a impartir y de la bibliografía adecuada al nuevo enfoque, así como la preparación de nuevos materiales didácticos: problemas propuestos, prácticas, ejemplos, etc. Esta labor se ha extendido a varios cursos académicos, quedando en una constante y continuada revisión al no ser una cuestión cerrada.

Las innovaciones docentes que consideramos más interesantes, de entre las llevadas a cabo, hasta la fecha, en relación con la asignatura son:

- ✓ Adaptación de problemas reales de ingeniería eléctrica al nivel de un curso básico de electromagnetismo [1, 2].
- ✓ Establecimiento de talleres voluntarios, para la realización, por parte de los estudiantes, de problemas en grupos pequeños tutorizados por un profesor.
- ✓ Implantación de nuevas prácticas que ayuden a comprender mejor la parte teórica [3, 4].
- ✓ Realización de experimentos en el aula como refuerzo a lo explicado en pizarra o mediante medios audiovisuales [5] con resultados altamente satisfactorios en opinión de los alumnos.
- ✓ Desarrollo, por parte de los estudiantes, de pequeños prototipos útiles para la enseñanza de la asignatura.

Para finalizar, indicar que en los dos últimos años estamos analizando las posibilidades de utilizar técnicas numéricas de resolución de problemas electromagnéticos, como el método de elementos finitos, en la mejora de la docencia [6, 7, 8].

Durante varios años hemos promovido la realización de trabajos voluntarios, que contribuyen, con un máximo del 10% a la nota final del estudiante y permiten mejorar algunos aspectos docentes relacionados con la asignatura como los reseñados a continuación. Una parte de nuestros alumnos de primer curso proceden de ciclos formativos y, en general, señalan que el primer curso de carrera es demasiado teórico. Iniciativas como la propuesta en este documento ayudan a reducir este problema e incrementan su motivación. Además, una parte de los trabajos realizados son pequeños prototipos de dispositivos útiles en la docencia de la asignatura. A continuación reseñaremos algunos, de los ya realizados, a título ilustrativo.

- Experimento del salto del anillo de Elihu-Thomson [9,10].
- Bobina que levita sobre plano de material paramagnético.
- Sistema para medida de la temperatura crítica de un superconductor.
- Demostración de la disminución de las pérdidas en la transmisión de energía al aumentar la tensión.
- Demostración del efecto Peltier y su reversibilidad.
- Motor elemental trifásico de inducción cuyo rotor está construido con una lata de conserva.
- Motor elemental con volante de inercia y electroimán.
- Sistema para la medida de campos electrostáticos basado en JFET.
- Sistema experimental para demostración de la tensión de paso.

Al inicio de este curso académico se organizó una pequeña exposición con los prototipos desarrollados, que sirve como introducción a la asignatura.

La realización de estos prototipos ha recibido el apoyo de nuestra Universidad en los tres últimos años, materializado en la concesión de tres Proyectos de Innovación Docente, sucesivos y anuales, para su realización. En este contexto se enmarca el proyecto que presentamos en ésta comunicación que consistió en realizar un concurso entre los trabajos de asignatura para seleccionar el mejor y enviarlo a éste congreso. La organización de la actividad, el resultado de la misma y nuestra valoración la detallamos en el siguiente apartado.

En los apartados 4 y 5 describiremos en detalle el trabajo desarrollado por los estudiantes, su valor didáctico y sus posibilidades en la docencia de la asignatura.

3. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA

La actividad docente propuesta consiste en organizar un concurso de selección entre los trabajos voluntarios presentados por los alumnos de una determinada asignatura. A partir del trabajo ganador se ha elaborado la comunicación que nos ocupa. La asignatura elegida es de electromagnetismo básico del primer

curso de la titulación de Ingeniería Técnica Industrial. Por supuesto, el planteamiento puede extrapolarse a diferentes materias y titulaciones.

La acción se organizó del siguiente modo: A principio del curso académico, se propuso a los estudiantes de la asignatura la posibilidad de realización, voluntaria, de un pequeño trabajo de curso. Posteriormente se les informó que el mejor trabajo se presentaría a un Congreso de Innovación Docente al que, en caso de aceptación, se desplazarían los estudiantes responsables del trabajo para exponerlo.

Durante el mes de abril se abrió el plazo de presentación de memorias para participar en el concurso. Luego se constituyó un tribunal con tres profesores de la escuela para la selección de los mejores trabajos. Al ser el primer año de realización del concurso también se abrió la convocatoria a alumnos que presentaron trabajos de asignatura en cursos anteriores.

La idea básica de esta experiencia fue incentivar la realización de trabajos con la posibilidad de su exposición pública en un congreso. De esta forma se esperaba conseguir una mayor motivación por la materia explicada en la asignatura. La respuesta general ha sido fría, recibándose muy pocas participaciones. Tampoco el número de trabajos ni su calidad, exceptuando el seleccionado, ha experimentado un especial incremento. Por ello consideramos que esta iniciativa no tiene especial interés en la mejora de la motivación, al menos con alumnos de primer curso y de momento no pensamos repetirla. No obstante, estamos vivamente interesados en recibir información sobre experiencias análogas en otros lugares y su aceptación entre los estudiantes.

Pese a lo dicho en el párrafo anterior, nuestra valoración de la actividad llevada a cabo en esta ocasión es positiva. Ello se debe al excepcional trabajo realizado por los estudiantes responsables del prototipo seleccionado y al valor de la máquina construida como recurso didáctico en la docencia de la asignatura. Éste resultado particular compensa la falta de interés general. Nuestra experiencia docente indica que aunque las enseñanzas y los recursos didácticos se dirigen al conjunto de los estudiantes, sólo unos pocos responden a ellos. Esto es perfectamente aplicable al caso que nos ocupa. La ejecución de trabajos de clase sólo interesa a una pequeña parte del alumnado total. No obstante, mirando con perspectiva los trabajos realizados a lo largo de los últimos cursos, que en algunos casos han desembocado en la realización de proyectos fin de carrera, y la calidad de los prototipos que al final han quedado como fondos del departamento, concluimos que es una actividad fructífera desde el punto de vista docente. Aunque sólo “resuene” con una parte pequeña del alumnado y aunque buena parte de los trabajos realizados no alcancen la calidad suficiente, se consiguen resultados que permiten mantener el interés didáctico por este tipo de iniciativa.

4. LA MÁQUINA DE VAN DE GRAAFF Y SU PAPEL EN LA DOCENCIA DEL ELECTROMAGNETISMO

El proyecto que resultó ganador del concurso descrito en el apartado anterior fue el diseño y construcción de un prototipo de máquina de Van de Graaff. El prototipo construido será una valiosa herramienta para el desarrollo de muchas experiencias docentes de electrostática. Ha sido totalmente construida por los

estudiantes que firman esta comunicación, basándose en un diseño clásico [11].

4.1 Introducción histórica

Las viejas máquinas electrostáticas que proliferaron durante el siglo XVIII se extinguieron prácticamente en su totalidad en torno a 1800 a consecuencia del descubrimiento de la pila de Volta. En esa época alcanzaron la supremacía los generadores basados en discos que giran y se cargan por inducción o frotamiento, como los de Wimshurst, Holtz y otros, en detrimento de los sistemas basados en bandas móviles como los de Walckiers o Bohnenberger que nunca pudieron competir con ellos [12].

En el siglo XX resurgió una nueva máquina electrostática, de banda móvil, que permitió obtener tensiones continuas mucho más elevadas que las que podían obtenerse por cualquier otro medio conocido. Esta invención dio un nuevo impulso a los estudios en el campo de la física de partículas. Nos referimos al generador inventado en 1929 por Robert J. Van de Graaff.

En 1933, Van de Graaff, construyó, en un hangar para dirigibles de Dartmouth, Massachussets, una máquina capaz de generar 5 MV. Fue construida con dos esferas de aluminio de 2 metros de diámetro montadas sobre columnas aislantes de 7,5 metros. El sistema completo se apoyaba sobre una sólida base metálica montada sobre raíles de tren que mantenía las esferas a 13 metros sobre el nivel de tierra y permitía acercarlas o alejarlas entre sí. En 1950 esta máquina fue donada al museo de Boston donde se encuentra instalada en la actualidad y con la que se realizan demostraciones diarias [13] siendo, probablemente, la máquina de mayores dimensiones que existe en la actualidad.

No obstante, existen máquinas, derivadas de la de Van de Graaff (Pelletron [14], Vivitron [15]) que permiten tensiones de salida mayores a base de sustituir el aire circundante por vacío u otros medios de mayor tensión de ruptura y de introducir algunas mejoras en el proceso de transferencia de carga. Así existen modelos que obtienen hasta 30 MV.

Merece la pena nombrar aquí otro generador derivado de la idea de Van de Graaff, pero de construcción radicalmente distinta y mucho más simple, que denominaremos máquina de Lorente, en honor a su inventor Gabriel Lorente, patentada en 1991. Esta máquina consta de cuatro rodillos giratorios, que rozan entre sí. Los dos cilindros centrales son de teflón y nylon, cargándose con cargas de distinto signo al frotar uno contra el otro. Los dos rodillos exteriores son metálicos y aislados de tierra. Estos recogen la carga de los rodillos centrales y la llevan a los terminales en contacto con ellos [16]. La máquina descrita, por su sencillez constructiva, tiene grandes posibilidades para aplicaciones docentes.

4.2 Descripción de funcionamiento

La máquina consiste en una esfera metálica hueca aislada de tierra a la que se transportan cargas, desde la tierra, mediante una cinta continua, de material dieléctrico, desplazada por un conjunto de motores y poleas (véase figura 1). El material que separa la esfera metálica de tierra debe tener una gran capacidad de aislamiento ya que corrientes de fuga de microamperios reducen mucho sus

prestaciones. Por ello no pueden utilizarse madera y otros similares; sin embargo son adecuados PVC, metacrilato, etc.

Existen varios sistemas de carga de la cinta transportadora. En el modelo que nos ocupa es cargada por fricción. Para ello, el rodillo superior está construido de PVC, de esta forma carga por rozamiento la parte interior de la cinta dieléctrica. El rodillo inferior está constituido por un cilindro de PVC recubierto por un casquillo metálico exterior que se encuentra aislado del eje de tracción del motor (véanse detalles en figura 1). Cuando la carga generada en la parte interior de la cinta llega a tocar con el rodillo metálico se carga. Tras un cierto tiempo se alcanza el equilibrio en el que ambos cilindros adquieren carga neta de distinto signo (el signo de la carga en cada cilindro depende de los materiales utilizados en el rodillo superior y en la cinta transportadora).

La máquina se completa con dos peines de púas metálicas que se colocan próximos a la cinta, pero sin tocarla, en la zona de los rodillos (véase figura 1). El peine cercano al cilindro inferior se conecta a tierra y el cercano al cilindro superior se conecta a la parte interior de la esfera metálica.

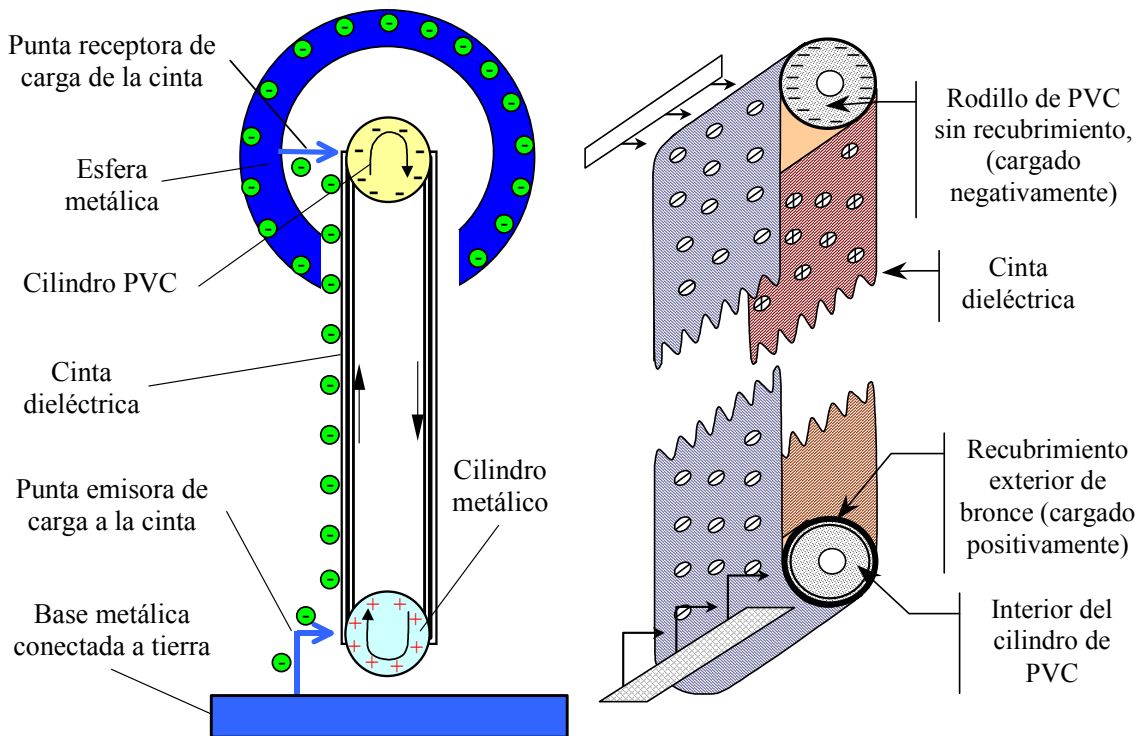


Figura 1. Esquema del generador de Van de Graaff construido.

De esta forma puede transferirse carga neta, de tierra a la esfera mediante el siguiente mecanismo: la carga del cilindro inferior atrae por inducción cargas de signo contrario a las puntas del peine inferior. Estas saltan, por efecto punta, a la cara exterior de la cinta y son transportadas por su movimiento. Cuando llegan a la zona del rodillo superior son repelidas por su carga siendo recibidas por el peine superior, en contacto con la cara interior de la esfera metálica. Por las propiedades electrostáticas de los conductores se deduce que todas las cargas así depositadas pasan a la superficie exterior de la esfera. La acumulación de cargas en la esfera metálica sólo está limitada por el radio de

ésta y la tensión de ruptura del gas que la rodea. Del funcionamiento de la máquina se deduce que puede cambiarse el signo de la carga acumulada en la esfera sin más que intercambiar los rodillos.

4.3 Posibilidades didácticas

Aunque las máquinas de Van de Graaff tienen importantes aplicaciones en el terreno científico (física de alta energía, astrofísica) e industrial (rayos X, tratamiento del cáncer), construidas a una escala menor son un instrumento didáctico frecuente en un laboratorio de electricidad.

Máquinas pequeñas, con tensiones entre 20 y 200 kV, permiten observar demostraciones libres de riesgo sobre algunos fenómenos electrostáticos difíciles de visualizar en baja tensión. Uno de los más impresionantes son las descargas, visibles al acercarse a la esfera objetos metálicos conectados a tierra. Esto permite introducir el concepto de ruptura dieléctrica como el límite físico para la acumulación de carga en un conductor.

El aparato permite experimentar con fenómenos electrostáticos asociados a conductores cargados muy difíciles de intuir, como la distribución de cargas en conductores huecos en equilibrio, la carga por inducción o la tierra como camino para la circulación libre de carga. También pueden estudiarse fenómenos de apantallamiento del campo electrostático en el interior de un conductor o realizar experimentos para interpretar la ley de Gauss.

Otros ensayos clásicos con el generador son la repulsión entre objetos cargados por contacto con la esfera, como los pelos de una peluca, el molinillo electrostático, que se mueve por el efecto de salida de electrones por las puntas, o el efecto de movimiento de la llama de una vela por el viento iónico debido a la salida de iones de la esfera.

Este experimento, siguiendo el esquema de clasificación de demostraciones (DCS) propuesto por el Physics Instructional Resource Association (PIRA) [17], se clasifica con la siguiente referencia: 5A50.30. Puede encontrarse abundante información en internet sobre las universidades americanas que lo utilizan y sobre ensayos, materiales necesarios, esquemas, etc.

5. EL PROTOTIPO CONSTRUIDO

Utilizando materiales diseñados para otras aplicaciones, algunos de ellos reciclados, se construyó el generador. En la figura 2 se muestran dos fotografías del prototipo cuyas características son las siguientes:

Dimensiones:

Radio de la esfera: $R = 177 \text{ mm}$

Altura respecto a tierra de la esfera: $H = 1 \text{ m}$

Materiales utilizados:

Esfera: Un calderín de los empleados en calefacción, procedente de material de desguace, construido en hierro y cromado por la parte exterior.

Columnas aislantes: Se han construido de PVC, para el actual prototipo, aunque se proyecta construir otro cuyas columnas sean de metacrilato.

Rodillos: Encargados de hacer deslizar la cinta sinfín son de PVC y metálico, aislado del eje con PVC de anchura $a = 60 \text{ mm}$ y radio $r = 3 \text{ cm}$ y forma de barril para evitar el deslizamiento lateral de la cinta.

Cinta: Se han ensayado diferentes materiales que cumplan las características mecánicas necesarias de flexibilidad y elasticidad. Por fin se ha optado por utilizar cintas plásticas de las utilizadas para acordonar obras civiles obteniéndose con ellas resultados satisfactorios.

Con estos componentes y las dimensiones elegidas obtenemos para la máquina construida las siguientes **características eléctricas:**

Tal y como se han colocado los rodillos (el metálico en la parte inferior) la esfera adquiere carga negativa.

El campo de ruptura del aire vale: $E_r = 27 \text{ kV/cm}$ obteniendo que la tensión máxima alcanzable por la esfera respecto de tierra será,

$$V_{MÁX} = E_r \times R = 480 \text{ kV} \quad (1)$$

En la práctica siempre es menor por las irregularidades de la esfera y por las pérdidas por descargas silenciosas. En nuestra esfera hemos estimado una tensión máxima de unos 135 kV. Con la experiencia adquirida en la construcción del aparato entendemos que es posible mejorar sus prestaciones, con las dimensiones dadas, a base de optimizar el sistema de carga.

La carga máxima que puede acumularse en la esfera es:

$$Q_{MÁX} = V_{MÁX} \times 4\pi\epsilon_0 R = 9,45 \mu\text{C} \quad (2)$$

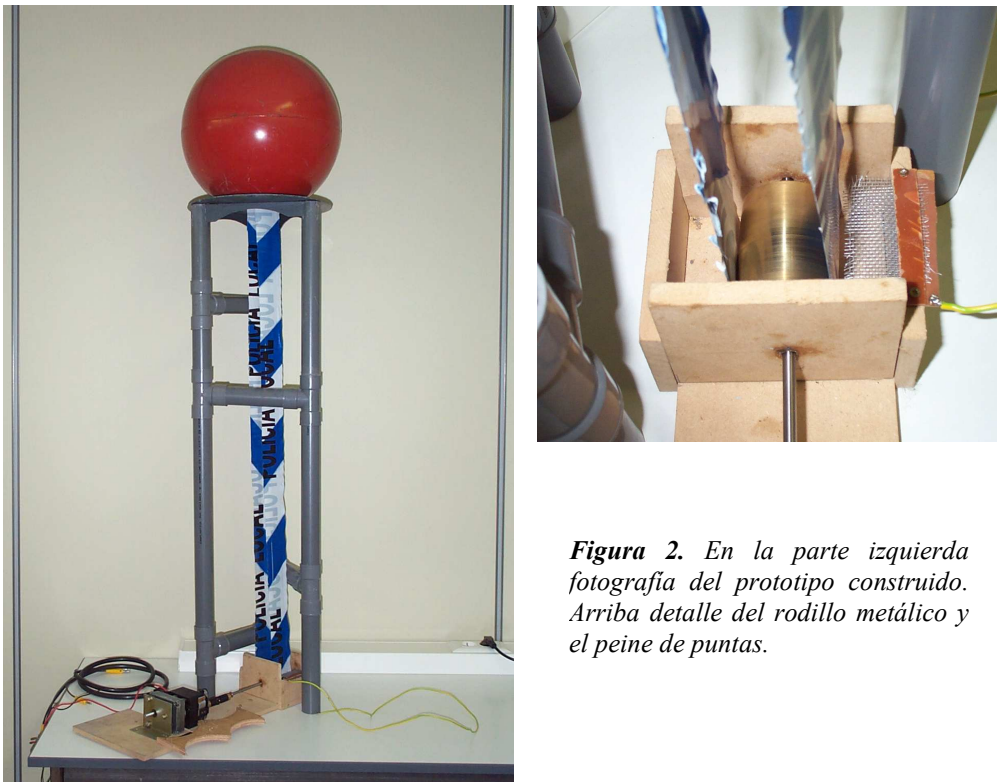


Figura 2. En la parte izquierda fotografía del prototipo construido. Arriba detalle del rodillo metálico y el peine de puntas.

Y por tanto la energía máxima acumulada vale:

$$W_{MÁX} = \frac{1}{2} Q_{MÁX} \times V_{MÁX} = 4,5J \quad (3)$$

La limitación de la carga de la esfera hace, que incluso generadores de dimensiones mucho mayores sean seguros, respecto a daños permanentes por electrocución entre los operadores de la máquina [13]. Los únicos riesgos de accidente derivados del funcionamiento del generador que se remarcan en la bibliografía [18] son los derivados de incendios o explosiones producidos por las chispas. Esto debe tenerse en consideración si la máquina ha de trabajar en un entorno con gases explosivos o sustancias inflamables. Por último, resaltar la importancia, para la docencia de la electricidad, de disponer de un generador de tensiones tan elevadas en condiciones de seguridad para los estudiantes.

6. CONCLUSIONES

La respuesta general de los estudiantes a la realización de trabajos de asignatura no ha mejorado con la perspectiva de su posible difusión pública en un congreso docente. De ello deducimos que esta acción docente no es un estímulo adecuado para aumentar la motivación del grueso del alumnado.

No obstante, la respuesta particular de unos pocos estudiantes ha sido muy positiva, sirviendo para redoblar sus esfuerzos en la consecución de un buen trabajo. Un ejemplo de ello es el trabajo seleccionado y descrito en esta comunicación.

El resultado es un prototipo de máquina de Van de Graaf operativo, en el rango de los cientos de kilovoltios, que permite realizar varios experimentos electrostáticos, para los que se requiere alta tensión, en condiciones de seguridad.

AGRADECIMIENTOS

Esta comunicación ha sido desarrollada con la financiación del Programa de Innovación Docente y Renovación Pedagógica de la Universidad de Zaragoza. Convocatoria 2002/2003.

REFERENCIAS

- [1] Letosa Fleta J., Usón Sardaña A., “Una introducción al calentamiento de dieléctricos mediante campos eléctricos de alta frecuencia.” VIII Congreso de Innovación Educativa en Enseñanzas Técnicas (CIEET’00). San Sebastian, septiembre 2000. ISBN 84-7585-402-8.
- [2] Usón Sardaña A., Letosa Fleta J., “Tensiones de paso y de contacto en un curso básico de electromagnetismo.” VIII Congreso de Innovación Educativa en Enseñanzas Técnicas (CIEET’00). San Sebastian, septiembre 2000. ISBN 84-7585-402-8.
- [3] Letosa J., Usón A., Abad P., “Comprobación experimental en el laboratorio del fenómeno de la Tensión de Paso.” 2 Congreso Internacional. Docencia Universitaria e Innovación (CIDUI’02). Tarragona, septiembre 2002. ISBN 84-88795-63-7.
- [4] Samplón M., Artal J.S., “Exposición Docente de los conceptos de calibración, trazabilidad metrológica e intercomparación.” 2 Congreso Internacional. Docencia Universitaria e Innovación (CIDUI’02). Tarragona, septiembre 2002. ISBN 84-88795-63-7.

- [5] Usón A., Artal J.S., Mur J., Letosa J. y Samplón M. “La incorporación de experimentos en las clases teóricas de electromagnetismo.” XI Congreso de Innovación Educativa en Enseñanzas Técnicas (CIEET’03). Vilanova y Geltrú, julio 2003.
- [6] Artal J.S., Letosa J., Uson A., Samplón M. y Arcega F.J. “Potencial y Campo Eléctrico. Concepto, análisis y simulación en un entorno didáctico.” X Congreso de Innovación Educativa en Enseñanzas Técnicas (CIEET’02). Valencia, julio 2002. ISBN 84-9705-207-2.
- [7] Uson A., Artal J.S., Letosa J., Samplón M. and Mur J. “Finite elements software for electromagnetics applied to electrical engineering training.” International Conference on Engineering Education (ICEE’03). Valencia, julio 2003.
- [8] Backstom G. “Fields of Physics by Finite Element Analysis.” Studentlitteratur, Lund. Sweden 1998. ISBN 91-44-00655-1.
- [9] Barry N., Casey R.; “Elihu Thomson’s jumping ring in a levitated closed-loop control experiment”, IEEE Transactions on Education, V. 42, N° 1, February, 1999.
- [10] Franco García, “Curso interactivo de física en internet” Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Eibar; Universidad del País Vasco; www.sc.ehu.es/sbweb/fisica. En la parte de electromagnetismo hay un apartado dedicado al anillo de Thomson.
- [11] Puede encontrarse abundante información sobre las máquinas de Van de Graaff en la página de Lyonel Braum <http://members.aol.com/lyonelb/vdg.html>.
- [12] Breeni, P.; “The Van de Graaff generator”, Bulletin of Scientific Instruments Society N. 63, 1999, también puede encontrarse en la Web en: <http://members.aol.com/lyonelb/sis.html>.
- [13] Teatro de la Electricidad” del museo de Boston www.mos.org/sln/toe/.
- [14] National Electrostatic Corporation, NEC, sobre sus generadores Pelletron, www.pelletron.com.
- [15] Laboratorio donde se encuentra instalado un generador Vivitron, una de las tres únicas máquinas en el mundo que superan los 20 MV de tensión de salida <http://ireswww.in2p3.fr/ires/recherche/vivitron/description.html>
- [16] Una explicación sobre la máquina de Gabriel Lorente puede encontrarse en <http://info.uned.es/electrostatic-generator/index.html>
- [17] Physics Instructional Resource Association, <http://www.wfu.edu/physics/pira/PIRAHome3.html>
- [18] Folliot D., Menguy C., Comini R.; “Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo”, Capt. 40, 3ª Ed. en castellano, Ministerio de trabajo y asuntos sociales, 2001, <http://www.mtas.es/Publica/enciclo/>.