

## SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

Ingeniería de Control y Protección

## MANTENIMIENTO

Inspección automática integral por ultrasonidos

## FOTOELASTICIMETRÍA

Modernizando una vieja técnica

## REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES

Medida y gestión de la demanda

## PROCESOS INDUSTRIALES

Controlador Neuro-Robusto

## CONSTRUCCIÓN

Control de vibraciones en pasarelas

## ENSAMBLADO EN AERONAUTICA

Sistema de manos libres

## INGENIERÍA EN MEDICINA

Parametrización de articulación

## TECNOLOGÍA ENERGÉTICA

Eficiencia de una caldera de biomasa

## TRABAJADORES DISCAPACITADOS

Rotación de puestos para su integración



Precio por ejemplar. 31,20 €



# DYNA

## ACCESO ILIMITADO PARA INSTITUCIONES Y ORGANIZACIONES

Consiga un acceso *on-line* a la base de datos de artículos completa de DYNA para cada ordenador en su Universidad, Biblioteca o lugar de trabajo.

Pregunte por una licencia de acceso *on-line* enviando un email a [dyna@revistadyna.com](mailto:dyna@revistadyna.com)

Fundada en 1926, DYNA es una de las revistas de ingeniería general más influyentes y prestigiosas del mundo, como lo reconoce Thomson-Reuters en la edición anual de su informe JCR.

Publica 6 números al año con contenidos científicos innovadores en el amplio abanico de la ingeniería multidisciplinar: mecánica, eléctrica, metalúrgica, energética, gestión...

La suscripción *on-line* permite acceder al archivo histórico de los artículos de la revista de manera ilimitada a los usuarios de una organización con IP fija. Este tipo de acceso a contenidos simplifica la gestión de usuarios y contraseñas y abarata el acceso a la información de grandes volúmenes de lectores. La base de datos de artículos de DYNA crece mes a mes y actualmente se remonta al año 1970.



**DYNA DIGITAL**

<http://www.revistadyna.com>

La Revista DYNA es el Órgano Oficial de Ciencia y Tecnología de la Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España (FAIE).  
Fundada en 1926, DYNA es una de las revistas de ingeniería más influyentes y prestigiosas del mundo, como lo reconoce Thomson-Reuters en la edición anual de su informe JCR.  
Es el medio más indicado para la comunicación de los Ingenieros Industriales Superiores y de cuantos vean en ella el medio de expresión de sus ideas y experiencia.

DYNA es una revista bimestral que edita 6 números al año: febrero, abril, junio, agosto, octubre y diciembre.

En el número de diciembre de cada año se publican los índices acumulativos por materias y autores de los artículos publicados en el año.

<http://www.revistadyna.com>

[dyna@revistadyna.com](mailto:dyna@revistadyna.com)

#### CONSEJO DE ADMINISTRACIÓN

**Presidente de Honor:** Luis Manuel Tomás Balibrea (FAIE. - Madrid)  
**Presidente:** Néstor Goicoechea Gandiaga (Asociación de Bizkaia - Bilbao)  
**Vicepresidente:** José Esteban Fernández Rico (Asociación de Asturias - Oviedo)  
**Secretario-no consejero:** Carlos López de Letona Ozaita (Asociación de Bizkaia - Bilbao)

#### Vocales:

**Emilio Gómez-Villalba Ballesteros** (Asociación de Andalucía Oriental - Granada),  
**Germán Ayora López** (Asociación de Andalucía Occidental - Sevilla), **Javier A. Rodríguez Zunzarren** (Asociación de la Comunidad Valenciana - Valencia), **Joan Torres i Carol** (Asociación de Catalunya - Barcelona), **Miguel Ángel Martínez Lucio** (Asociación de Madrid - Madrid),  
**José María Ruíz-Tapiador Trallero** (Asociación Aragón - Zaragoza), **Manuel Lara Coira** (Asociación de Galicia - Santiago), **Pedro Hernandez Cruz** (Asociación de Cantabria - Santander), **Pedro Jiménez Mompean** (Asociación de la Región de Murcia- Murcia).

#### OTROS SOCIOS

**Ramón Larrinoa Barreda** (Colegio de Alava), **Gabriel Egaña Uranga** (Colegio de Gipuzkoa), **Carlos Izkué Montejo** (Colegio de Navarra), **Francisco J. Marrodán Esparza** (Asociación de La Rioja), **Jesús María Mirat Celdrán** (Asociación de Extremadura), **Alfonso Panadero Martínez** (Asociación de Albacete), **Andrés Pérez Bermúdez** (Asociación de Canarias), **Alfredo Arias Berenguer** (Asociación de Baleares), **Manuel María Uruña Cuadrado** (Asociación León - León).

#### CONSEJO DE REDACCIÓN

**Presidente:** Luciano Azpiazu Canivell (Iberdrola - Bilbao)  
**Vicepresidente:** Leopoldo Espolita Carreño (Asociación de Asturias y León - Oviedo)  
**Secretario:** Carlos López de Letona (Asociación de Bizkaia - Bilbao)

#### Vocales:

**Alberto Del Rosso** (Universidad Tecnológica Nacional - Buenos Aires, Argentina), **Alfonso Parra Gómez** (Asociación de Bizkaia - Bilbao), **Antonio Adsuar Benavides** (Conselleria de Industria Comercio e Innovación - Valencia) - **Eduardo Valle Peña** (Asociación de Cantabria - Santander), **Blas Hermoso Alameda** (Universidad Pública de Navarra - Pamplona),  
**Franck Giroit** (Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers - Paris, Francia), **Fernando Gujardo Merelles** (Universidad de Extremadura - Cáceres), **Fernando López Rodríguez** (Agencia Extremeña de la Energía - Cáceres), **Ferrán Puerta Sales** (Universidad Politécnica de Cataluña - Barcelona), **Ignacio Fernández de Aguirre Guantes** (Instituto de Fundición Tabira - Durango), **Javier Barrondo Apodaca** (Iberdrola - Bilbao), **Jesús María Cantera Sojo** (Secot - Bilbao), **José Manuel Palomar Carnicero** (EPS Jaén - Jaén), **José María Bueno Lidón** (Green Power Tech - Sevilla), **José Rafael Castrejón Pita** (University of Cambridge - Cambridge, UK), **Juan M. Gers** (Gers USA LLC - Weston, Florida, USA), **Manuel Lara Coira** (Escuela Politécnica Superior de Ferrol - Ferrol), **Nicolás Gaminde Alix** (Asociación Bizkaia - Bilbao), **Joan L. Serarols Font** (Universidad de Girona - Girona), **Pedro J. Otaduy** (Oak Ridge National Laboratory - Oak Ridge, Tennessee, USA), **Raimundo Martínez Giménez** (Euroconseil - Sevilla).

#### CONSEJO ASESOR

**Allan Joseph Wailoo** (Universidad de Sheffield - Sheffield, UK), **Angel Mena Nieto** (Universidad de Huelva - Palos de la Frontera), **Carlos García Crespo** (Universidad de Mondragón - Mondragón), **Emilio Ollas Ruiz** (Universidad Carlos III - Madrid), **Eva Martínez Caro** (Universidad Politécnica de Cartagena - Cartagena), **Javier Santos García** (Universidad de Navarra - San Sebastian), **Jorge Arturo Del Ángel Ramos** (Universidad Veracruzana - Veracruz, Méjico).

#### DIRECCIÓN

José María Hernández Álava

© 2011. Publicaciones DYNA S.L.

Publicaciones DYNA SL, a los efectos previstos en el artículo 32.1, párrafo segundo del vigente TRLPI, se opone expresamente a que cualquiera de las páginas e DYNA, o partes de ella, sean utilizadas para la realización de revistas de prensa. Cualquier acto de explotación (reproducción, distribución, comunicación pública, puesta a disposición, etc.) de la totalidad o parte de las páginas de DYNA, precisará de la oportuna autorización, que será concedida por CEDRO ([www.cedro.org/](http://www.cedro.org/) / [www.conlicencia.com](http://www.conlicencia.com)).

Las opiniones y datos consignados en los contenidos son de exclusiva responsabilidad de los autores.

**ENTIDAD EDITORA:** Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España

#### ADMINISTRACIÓN, DIRECCIÓN, DISTRIBUCIÓN, EDICIÓN, PEDIDOS, PUBLICIDAD Y SUSCRIPCIONES:

Publicaciones DYNA S.L.,  
Alameda de Mazarredo, 69 - 48009 BILBAO.  
Tel.: +34 944 237566 - Fax +34 944 234461  
email: [dyna@revistadyna.com](mailto:dyna@revistadyna.com)  
Instrucciones detalladas para los autores en la web: [www.revistadyna.com](http://www.revistadyna.com)

#### IMPRESOR: MCCGRAPHICS

C/ Larrondo Beheko Etorbidea, edif. 4 Nave 1 - 48180 LOIU (Vizcaya) -  
Tel.: +34 944 535 205. e-mail: [elkar@mccgraphics.com](mailto:elkar@mccgraphics.com)  
Formato: 21 x 29,7 cm (A4)  
D.L. BI-6-1958  
ISSN 0012-7361  
ISSN electrónico 1989-1490  
SICI: 0012-7361(20110601)86:3<>1.0.TX;2-U  
CODEN: DYNAAU

Tirada de este número: 4.605 (papel) y 23.994 (digital)

Ejemplares vendidos: 3.540 (papel) y 23.994 (digital)

#### UNIVERSIDADES COLABORADORAS

ETS de Bilbao, EPS de Ferrol, ETS de Vigo, EPS de la Universidad Carlos III de Madrid, EPS de Gijón, ETS de San Sebastián (Tecnun), ETS de Cartagena, ETS de Terrassa, EPS de la Universidad de Mondragón, EPS de Girona, ETS de Santander, ETS de Valencia, EPS Córdoba, EPS Elche, Universidad Rovira i Virgili, Universidad de Huelva.

#### ORGANIZACIONES COLABORADORAS

CEIT-IK4, Euskalit, Tecnalia, ITEC, ITE

#### ORGANIZACIONES AMIGAS DE DYNA

Tecnalia y SP Mutua

Miembro de:

- Council of Science Editors
- Asociación Española de Comunicación Científica



# Suscripción anual Institucional

(Estos precios no incluyen el 4% de IVA)

<b>España</b> .....	140,00 €
<b>Número suelto</b> .....	30,00 €
<b>Extranjero</b> .....	199,00 €
<b>Número para extranjero</b> .....	38,00 €
<b>Suscripción WEB ilimitada al archivo histórico</b> .....	a consultar

Los ejemplares se envían por correo ordinario y su precio incluye los gastos de envío.

Forma de pago: Contado previo al envío de la revista

Medio de pago preferente: Domiciliación.

Para suscripciones, pedidos, reclamaciones, renovaciones, cancelaciones o cambios de domicilio enviar un correo electrónico a [dyna@revistadyna.com](mailto:dyna@revistadyna.com) indicando el motivo del mensaje, la identificación de la persona o entidad, NIF o CIF, dirección postal, teléfono y correo electrónico.

Existe un formulario de suscripción en nuestra página web:

<http://www.revistadyna.com>

## Tarifas publicitarias

(Estos precios no incluyen el 18% de IVA)

<b>Revista Impresa</b>	<b>Izda.</b>	<b>Dcha.</b>
Página a color	986 €	1.125 €
1/2 página a color (Horizontal o vertical)	643 €	739 €
1/4 página a color (Horizontal o vertical)	407 €	468 €
Interior Portada .....	1.164 €	
Interior Contraportada.....	1.007 €	
Contraportada .....	1.200 €	
Encartes y Publireportajes .....	a consultar	
<b>Revista digital (<a href="http://www.revistadyna.com">http://www.revistadyna.com</a>)</b>		
Banner web de 180x60 pixels (mínimo 7 días) .....	20 €/día	
Banner web de 700x80 pixels (mín. 7 días) .....	80 €/día	
Inserción en Boletín electrónico .....	a consultar	

Páginas visitadas al mes: 30.000 (Google Analytics)

Nuestro formato impreso es A4 a todo color (21 x 29,7 cm)

El material digital original será por cuenta del anunciante. Los anuncios con indicación del lugar de colocación tendrán un aumento del 25%.

## Incluida en / Indexed in

**COMPLUDOC (Universidad Complutense de Madrid)**

<http://europa.sim.ucm.es/compludoc>

**DIALNET (Universidad de La Rioja)**

<http://dialnet.unirioja.es>

**FUENTE ACADEMICA PREMIER (Ebsco Publishing)**

<http://www.ebscohost.com>

**GEOREF (American Geological Institute)**

<http://www.agiweb.org>

**GOOGLE SCHOLAR**

<http://scholar.google.es>

**ICYT (Consejo Superior de Investigaciones Científicas)**

<http://www.csic.es>

**INSPEC (The Institution of Engineering & Technology)**

<http://www.theiet.org>

**LATINDEX (Sistema Regional de Información en línea para Iberoamérica)**

<http://www.latindex.org>

**PASCAL (Centre National de la Recherche Scientifique)**

<http://www.inist.fr>

**RECYT (Fundación Española de la Ciencia y Tecnología)**

<http://recyt.fecyt.es>

**SCIENCE CITATION INDEX EXPANDED - JCR (Thomson-Reuters)**

<http://www.thomsonscientific.com>

**SCOPUS (Grupo Elsevier)**

<http://info.scopus.com>

**SUMARIS (Biblioteques Universitaries de Catalunya)**

<http://sumaris.cbuc.es>

**TECHNOLOGY RESEARCH DATABASE (ProQuest)**

<http://www.proquest.com>

**ULRICH'S PERIODICALS DIRECTORY (Grupo Elsevier)**

<http://ulrichsweb.com>

### BOLETIN DE SUSCRIPCIÓN:

\*Nombre y 2 apellidos ..... Empresa .....

\* NIF / CIF ..... \*Dirección de envío suscripción .....

\*CP ..... \*Población ..... \*Provincia.....

\*Teléfono ..... Móvil ..... Fax .....

E-mail ..... Web .....

Fecha..... Fecha ..... Firma y Sello

### FORMA DE PAGO SELECCIONADA:

Transferencia  Cheque nominativo

Domiciliación bancaria

Ruego a Uds. que con cargo a cta./libreta:

--	--	--	--

Entidad

--	--	--	--

Agencia

--	--

D.C.

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Oficina

Domicilio Sucursal..... Cod.Postal..... Población ..... Titular .....

Atiendan hasta nuevo aviso los recibos que presente Publicaciones DYNA SL.

Remitir este boletín de suscripción o sus datos por:

#### CORREO POSTAL:

Publicaciones DYNA SL  
Alda. Mazarredo 69 – 3º  
48009-Bilbao

#### CORREO ELECTRÓNICO:

[dyna@revistadyna.com](mailto:dyna@revistadyna.com)

#### FAX:

+34 94 423 44 61

#### PÁGINA WEB:

<http://www.revistadyna.com>  
Donde existe un formulario de suscripción

Los campos señalados con un \* son obligatorios, y por tanto necesarios para atender su petición.

En cumplimiento de lo establecido en la LOPD 15/1999, le informamos y en este sentido usted consiente, que los datos personales, que nos facilite, sean tratados y queden incorporados en los ficheros de PUBLICACIONES DYNA SL, para el envío periódico de la revista Dyna, sus datos no serán objeto de cesión alguna. En el caso de que no dé su consentimiento para el tratamiento de sus datos, será imposible prestar correctamente los servicios solicitados. Usted además consiente, el envío (incluso por medios electrónicos), de comunicaciones comerciales y publicitarias, por parte de PUBLICACIONES DYNA SL, se compromete a mantener actualizados los mismos, y podrá ejercitar los derechos de acceso, rectificación, cancelación y oposición, dirigiéndose a PUBLICACIONES DYNA SL, C/Alameda de Mazarredo, 69, 48009 Bilbao.

No autorizo el envío por medios electrónicos de información comercial, por parte de PUBLICACIONES DYNA SL.

No deseo que mis datos sean empleados con finalidades publicitarias por parte de PUBLICACIONES DYNA SL.



246

DYNA hace 80 años

248

Noticias Breves

250

Sociedad e Ingeniería Industrial

254

Evolución

256

Aula DYNA

260

Noticias

264

Colaboraciones

361

Desarrollo Sostenible

273



INGENIERÍA DE CONTROL Y PROTECCIÓN DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

*CONTROL AND PROTECTION ENGINEERING OF ELECTRICAL SUBSTATIONS*

Javier Orejas, Sergio Martínez

281

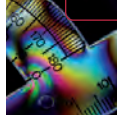


SISTEMA INTEGRAL PARA INSPECCIÓN AUTOMÁTICA POR ULTRASONIDOS DE RUEDAS ELÁSTICAS FERROVIARIAS

*AUTOMATIC INSPECTION SYSTEM FOR RAILWAY WHEELS*

Francisco Javier González-Fernández, María Antonia García-San Andrés, Carlos Sancho-de Mingo, Antonio González-Rodríguez, Miguel Gómez-Parra

292

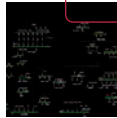


FOTOELASTICIMETRÍA: MODERNIZANDO UNA VIEJA TÉCNICA

*PHOTOELASTICIMETRY: UPGRADING AN OLD TECHNIQUE*

Manuel Solaguren-Beascoa Fernández

300

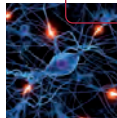


LAS NUEVAS REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES, SU MEDIDA Y GESTIÓN DE LA DEMANDA

*NEW ELECTRIC SMARTGRIDS, THEIR METERING AND DEMAND SIDE MANAGEMENT*

Carlos Madina-Doñabeitia, Ibón Arechalde-Ugarteche

308



CONTROLADOR NEURO-ROBUSTO PARA SISTEMAS NO LINEALES

*NEURO-ROBUST CONTROLLER FOR NON-LINEAR SYSTEMS*

Iván Machán-González, Hilario López-García, José Luis Calvo-Rolle

318



CONTROL DE VIBRACIONES EN PASARELAS PEATONALES

*VIBRATION CONTROL OF PEDESTRIAN BRIDGES*

Carlos Mariano Casado-Sánchez, Jesús de Sebastián-Sanz, Iván Muñoz-Díaz, Alfonso Poncela-Méndez, Antolín Lorenzana-Ibán

328



SISTEMA DE MANOS LIBRES PARA AYUDA DE ENSAMBLAJE EN AERONÁUTICA

*HANDS-FREE WEARABLE SYSTEM FOR HELPING IN ASSEMBLY TASKS IN AEROSPACE*

Diego Borro-Yágüez, Javier Serván-Blanco, Juan Manuel Cordero-Valle, Jairo Roberto Sánchez-Tapia, Fernando Mas-Mórate, Luis Matey-Muñoz

336



PARAMETRIZACIÓN DE LA ARTICULACIÓN GLENO-HUMERAL

*PARAMETERIZATION OF THE GLENO-HUMERAL JOINT*

Alberto Higuera-Garrido, Pablo Pando-Cerra, Aquilino Osorio-Zapico, Rosa María Verónica López-Vega

343



EFICIENCIA DE UNA CALDERA DE BIOMASA EN UN CENTRO HOSPITALARIO. APROVECHAMIENTO DE HUESOS DE ACEITUNAS TRITURADOS PARA PRODUCCIÓN DE CALOR

*EFFICIENCY OF A BIOMASS BOILER IN A HOSPITAL CENTER. USE OF OLIVE CRUSHING STONES TO PRODUCE HEAT*

Justo García Sanz-Calcedo, Francisco Cuadros-Blázquez, Antonio Ruiz-Celma, Fernando López-Rodríguez

350



LA ROTACIÓN DE PUESTOS DE TRABAJO COMO MEDIO PARA LA INTEGRACIÓN DE TRABAJADORES CON DISCAPACIDAD

*JOB ROTATION AS A METHOD FOR DISABLED WORKERS INTEGRATION*

Sabina Asensio-Cuesta, José Antonio Diego-Mas, María Carmen González-Cruz



# DYNA hace 80 años (mayo-junio 2011)

## LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA ESPAÑOLA EN 1930

“La industria siderúrgica, considerada en su conjunto, tuvo durante 1930 un año relativamente satisfactorio. El número de hornos altos en actividad fue de 21...y la producción total de lingote de hierro puede calcularse aproximadamente en 800.000 toneladas,...casi el doble de la producción en 1913”. Como la capacidad productiva era superior al millón de toneladas, se deduce que aun había exceso sobre la demanda.

“La producción de acero ha aumentado rápidamente durante los últimos años...por la gran demanda y por la sustitución del hierro fundido (piezas) por el acero...ascendiendo la producción de lingote de acero a 1.500.00 toneladas”. Existían como hornos de acero en España 3 Bessemer, 40 Siemens y 16 eléctricos, obteniéndose una cantidad final de productos de acero de 1.200.000 toneladas.

La producción de mineral de hierro fue de 6 millones y medio de toneladas, de las cuales se exportaron 4.800.000. El total de carbón y lignito extraídos ascendió a 7.5 millones de toneladas.

LUIS BARREIRO

## LAS RUEDAS DE FUNDICIÓN TEMPLADA EN LOS FF.-CC.

Presenta el autor como modelo la tecnología americana para ruedas de vagón en fundición templada. Allí, “veinticinco Compañías, poseyendo cincuenta fundiciones, se han agrupado en una Asociación...cuyo objeto es...adquirir el conocimiento más profundo de la fabricación y del servicio...y obtener y propagar las informaciones concernientes a ello”.

En Europa, aunque no era tan general, también se empezaban a utilizar estos tipos de ruedas y concretamente en España se habían instalado en tranvías y la Compañía del Norte las tenía montadas como ensayo en cuatro o cinco vagones. Para la promoción europea existía la Compañía Griffin, formada por seis fundidores, entre ellos Fundición Bolueta, S.A.

Describe el autor los ensayos que se realizan sobre este producto para garantizar su calidad.



LUIS DE BERAZA

## PARA LA HISTORIA:

ENTREVISTA a María del Pilar Careaga, Ingeniera Industrial.

Reproducimos el texto íntegro que prologa la entrevista.

“Siempre interesantes para el hombre las manifestaciones de una mujer inteligente, lo son mucho más como, en el caso presente, la interrogada une a su inteligencia, poco común, las dotes que la han elevado a la ostentación del título de Ingeniero Industrial.

Deferente y amable a nuestra solicitud, la presencia de M<sup>a</sup> del Pilar Careaga imbuje en el Ingeniero y en el hombre el sentimiento de una interesante selección.

No estando nuestro país sobrado de valores morales ni saturado de aficiones culturales, cuando estos factores se superponen en un espíritu selecto, la función desarrollada es de un excelso grado.

Esto acontece con la feminista M<sup>a</sup> del Pilar Careaga a quien estamos altamente reconocidos por su atención.

Sus observaciones, que las hemos de tener muy en cuenta, responden a una delicada y optimista concepción femenina expuesta con vigorosa masculinidad y acierto.

¡Enhorabuena a nuestra Compañera!



El accidente de Fukushima ha sido el tercero calificado en los más altos niveles de gravedad desde el comienzo de la generación eléctrica comercial por fisión nuclear en Calder Hall (Gran Bretaña), allá por los lejanos 1956.

Cada uno de ellos ha tenido su origen en causas diferentes y ocasionado consecuencias también diversas: Three Mile Island (Harrisburg USA, 1979), sin emisiones externas, Chernobyl (URSS, 1986) con gravísimos resultados para los trabajadores y población circundante, y ahora Fukushima, aún sin controlar totalmente, por ahora con menores repercusiones que Chernobyl, pero generando fuerte preocupación en el entorno.

Tras cada uno de ellos, la tecnología nuclear ha respondido con significativos avances en la seguridad de diseño y de uso, y es de esperar que después del actual, sean reconsideradas todas las instalaciones existentes y mejoradas aun más de lo previsto, tanto las de generación III en construcción y proyecto, como la llamada generación IV, todavía en sus primeros pasos conceptuales.

Sin embargo, para buena parte de la opinión pública, queda sin responder una pregunta clave: ¿supondrá este accidente la desaparición progresiva a plazo medio, 10 a 20 años de toda planta de fisión? Esto significaría nada menos que no arrancar e interrumpir todas las plantas que se encuentran en construcción o proyecto y cesar radicalmente todos los trabajos de diseño e investigación de las futuras, cualquiera que sea el tipo y la generación considerada. Por supuesto, cerrando definitivamente las actualmente operativas en el plazo de su vida útil.

Después de cada accidente se ha venido reproduciendo este debate y lo fue mucho más con el acaecido en Chernobyl, sobre todo porque daba la impresión de no haberse valorado nunca en su verdadera magnitud todas las posibilidades de fallo, por muy improbables que pareciesen. A pesar de ello, una vez pasado cierto tiempo, las aguas volvían a su cauce y el crecimiento mundial de la demanda energética ponía nuevos proyectos en marcha con el marchamo de una seguridad mejorada.

¿Era ello debido a oscuros intereses de poderes fácticos o se trataba simplemente de cubrir necesidades reales de energía por medios diferentes a los combustibles fósiles que los llamados renovables no se prevé que pudieran a corto plazo satisfacer? La respuesta no es sencilla, aunque pudiéramos tener la intuición, o incluso el deseo, de que la energía nuclear de fisión no sea una tecnología permanente y aspirásemos a un futuro en que estuviera en condiciones de ser sustituida en cantidad y costo.

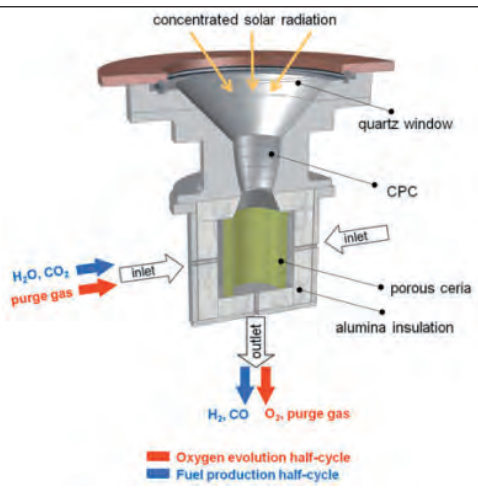
Importantes pasos ya se están dando en este sentido, y no solo con los medios renovables, sino también con los grandes proyectos nucleares de fusión por confinamiento magnético o por ignición láser de isótopos de hidrógeno. Los primeros precisan aún superar problemas de dimensión, costo, rendimiento y almacenaje, dado su carácter discontinuo; a los segundos les faltan todavía muchos años para demostrar su viabilidad industrial. Con cierta probabilidad, habrá que superar con mucho el ecuador del siglo XXI para poder asegurar que ambos medios son capaces de proporcionar la energía que el mundo precisará en esas fechas sin emisiones que aumenten el calentamiento global.

Sea cual sea el rumbo que tome la tecnología nuclear de fisión, queda la necesidad de buscar paralelamente soluciones estables y seguras, no solo a extremas situaciones en su funcionamiento, sino también a la deposición de los residuos radioactivos de larga vida. En el triste recuerdo están las elevadas cantidades de basura nuclear encapsulada, vertidas los años iniciales en las fosas marinas del Atlántico Norte. Las piscinas almacén de Fukushima han sido un gravísimo problema añadido a lo acaecido con los reactores y en todas las centrales en marcha podrían ser puntos más vulnerables aún que los mismos grupos. Son los países usuarios de la generación por fisión quienes deben abordar cuanto antes los medios precisos de almacenaje y apoyar los proyectos con impacto de neutrones que, al parecer, son capaces de reducir el ciclo de vida de los residuos radioactivos.

Resulta cuando menos desconcertante que, estando todas estas tecnologías en tan pocos consorcios mundiales que pueden contarse con los dedos de una mano, no sea posible conformar una hoja de ruta coordinada y satisfactoria de seguridad, evolución, desarrollo y posibilidad de sustitución en un horizonte a largo plazo.

Es en este sentido, donde los ingenieros industriales y sus asociaciones, juegan un papel indispensable como expertos, aportando tecnología aplicada que nos garantice soluciones viables a corto y medio plazo.





## ► REACTOR SOLAR

En la **Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Zurich** han desarrollado un reactor solar capaz de dissociar el vapor de agua y el  $\text{CO}_2$  productos de la combustión para obtener de nuevo gases combustibles ( $\text{H}_2$  y  $\text{CO}$ ),

El concentrador de cuarzo incide sobre una masa porosa de óxido de cerio, reduciéndola a  $1.500^\circ$ . Posteriormente la inyección de los citados productos de combustión, rehace la oxidación a unos  $900^\circ$ , liberando los mencionados gases combustibles.

Los investigadores aseguran haber obtenido en un reactor experimental que concentraba 2 Kw de potencia, una eficiencia de conversión en forma de mezcla combustible del 0,80%, dos veces mayor que los procesos fotocatalíticos probados hasta ahora. El reto será aumentar esa eficiencia hasta el 15% y la meta poder llegar a una planta industrial hacia 2020.

## ► UN COCHE ELÉCTRICO AL MERCADO

El **Leaf (Nissan)** marcará en el mundo occidental la aceptación de la energía eléctrica para vehículos automóviles de uso habitual. Este compacto de

cinco puertas, similar a otros tantos presentes en el mercado, con motor de 80 Kw, es capaz de alcanzar los 140 Km/h y circular a plena carga de baterías entre 200 y 160 Km según el modo de conducción.

Las baterías de ion-Li pesan 200 Kg y pueden ser recargadas en 8 horas utilizando un enchufe doméstico. En alimentadores especiales, la carga hasta un 80% se realiza en 30 minutos y una prolongación de recorrido para 50 Km en 10 minutos.

Al anuncio de su lanzamiento en Japón ya disponía de más de 26.000 reservas en ese país y en USA, y el precio, una vez deducidas las ayudas oficiales a la compra, estaba alrededor de los 3 millones de yenes.

## ► 2010, EL SEGUNDO AÑO MÁS CÁLIDO

La **Oficina Meteorológica del Reino Unido** anuncia que, pese al frío final del año en las islas, 2010 ha tenido una media mundial como el segundo más cálido desde que se registra este hecho, 1850, aunque la NASA y agencias americanas afirman que quizá fue el primero.

Según los datos manejados, la media global de temperatura se situó en  $14,5^\circ$ , prácticamente igual que en 2005, que se considera el más cálido. En el hemisferio norte, ello supuso  $0,69^\circ$  más que el promedio obtenido de las temperaturas entre 1961 y 1990. Los clima-escépticos tienen difícil de explicar que nueve de los diez años transcurridos del siglo XXI cuentan entre los de temperatura media más alta desde su registro.

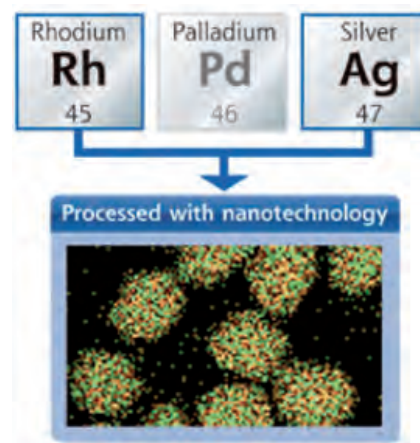
## ► NAVE ESPACIAL POR SUBCONTRATA

La finalización este año del programa de lanzaderas espaciales de la NASA hará depender los movimientos



de personas a y desde la Estación Espacial Internacional, de las cápsulas rusas triplaza SOYUZ. Por esa razón, la NASA ha destinado ayudas por valor de 50 millones de dólares a empresas privadas que desarrollen nuevas aeronaves tripuladas capaces de trasladar personas y suministros a la Estación Espacial.

Una de las más favorecidas ha sido Sierra Nevada Corp., que desarrolla el "Dream Chaser". Con un tamaño similar a los jets privados, podrá enviar hasta 8 personas y carga a la Estación, siendo capaz de aterrizar al retorno en cualquier aeropuerto comercial. Actualmente se encuentra pasando ensayos de resistencia y vibraciones en un simulador de terremotos de la Universidad de Colorado. Se espera ponerlo en órbita el año 2014 con un potente Atlas V.



## ► NUEVA ALEACIÓN

Investigadores de la Universidad de Kyoto, han conseguido por vez



primera en el mundo una aleación de dos metales teóricamente inaleables y con las propiedades de un tercero, situado entre ambos en la Tabla Periódica.

Utilizando recursos de nanotecnología se crean partículas con 10 nm de diámetro, conteniendo iguales cantidades de átomos de rhodio y plata, que al solidificar presentan iguales propiedades que el paladio, catalizador de amplio uso en los tubos de escape y como absorbente de hidrógeno.

Los investigadores reconocen la dificultad actual de llevar este proceso a nivel industrial, pero podría ser una base de trabajo para el campo de las tierras raras, tan cruciales para muchas tecnologías en desarrollo.

## ► EL BIOETANOL EN ALEMANIA

El Gobierno alemán se propone generalizar el uso del carburante E-10 (gasolina con 10% de etanol) con dos objetivos: reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y reducir la dependencia alemana del petróleo. Hasta ahora, la generalidad de surtidores con bioetanol correspondían a la mezcla E-5, con 5% de alcohol.

Sin embargo, no todo el mundo está de acuerdo con la inocuidad del uso de esa mezcla en los motores de explosión y algún experto con parte de usuarios hacen que no ascienda su demanda. La Asociación de la Industria del Automóvil alemana garantiza el uso de E-10 en los vehículos fabricados con las marcas propias de la República Federal. La promoción del bioetanol adquiere mayor importancia ante posibles futuros desarrollos de su obtención, no desde productos alimentarios sino a partir de residuos agrícolas o forestales, lo que se conoce como 2ª generación.



## ► ¿LECHUGAS ORNAMENTALES?

En la 3ª Exposición de la Tecnología del Alumbrado LED/OLED, tenuta el mes de enero en Tokio, se presentaron prototipos de plantas ornamentales obtenidas de especies vegetales comestibles.

La base tecnológica consistía en que el crecimiento en interiores de estas plantas se ha hecho alimentándolas con fuentes de luz procedentes de lámparas LED. Esto ha mejorado extraordinariamente los resultados con respecto a usar fluorescentes, cuyas radiaciones ultravioletas dañan las hojas.

De esa forma se puede recrear un ambiente agradable para el trabajo o el domicilio, con el añadido de que continúan siendo plantas comestibles. Ahora solamente falta alcanzar con las instalaciones precios competitivos.

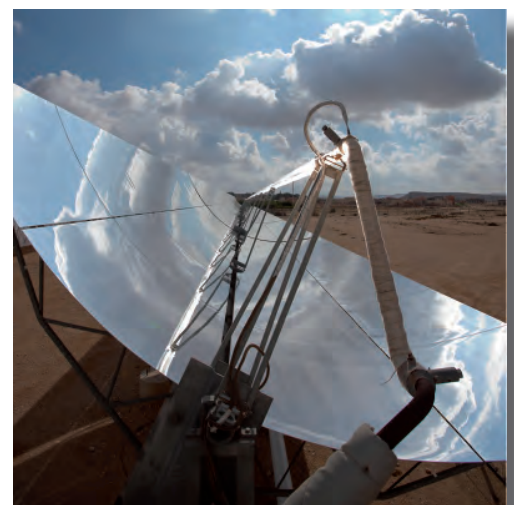
## ► SALES FUNDIDAS EN PLANTAS SOLARES

SIEMENS se propone utilizar sales fundidas en lugar de aceite térmico para aumentar la eficiencia de las plantas solares dotadas de espejos lineales parabólicos.

Actualmente con temperaturas de hasta 400°, el aceite circulando por los tubos calentados en los concentradores solares transfiere el calor a un sistema convencional agua-vapor. Utilizando sales, la temperatura podría ascender hasta los 500° y acercaría el rendimiento de las turbinas a sus valores óptimos.

Adicionalmente, frente a la elevada presión de vaporización, inflamabilidad y costo del aceite, las sales no son inflamables, carecen de presión de vapor y son más económicas. La dificultad estriba en diseñar la mezcla adecuada, posiblemente de nitratos sódico y potásico, de manera que su temperatura de solidificación se sitúe en alrededor de los 150°. El sistema de tuberías y de bombeo también debe ser capaz de soportar materiales y temperaturas.

Una planta piloto se va a instalar en los terrenos de la Universidad de Evora (Portugal).



# Sociedad e Ingeniería

Consejo de Colegios y Federación de Asociaciones de Ingeniería Industrial de España

**LA INGENIERIA ESPAÑOLA DISCREPA DEL PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERO EN ORGANIZACION INDUSTRIAL DEL CENTRO UNIVERSITARIO DE LA DEFENSA DE SAN JAVIER**

El pasado 7 de Marzo tuvo lugar en la sede del Ministerio de Defensa una reunión entre una Comisión de la Unión Profesional de Colegios de Ingenieros (UPCI) y el IIE -integrada por un representante de Aeronáuticos, Caminos, Navales e Industriales, el Presidente de la FAIIE, el Director General de Reclutamiento y Enseñanza Militar y el Subdirector General de Ordenación y Política de Enseñanza del Ministerio de Defensa, tres Generales -uno en representación de cada Ejército-, y el Director General de Política Universitaria del Ministerio de Educación.

A lo largo de la reunión se evidenciaron sustanciales diferencias de criterio entre la ingeniería española y el Ministerio de Defensa, que continuaba argumentando no precisar tener en consideración la opinión de las instituciones profesionales de la ingeniería en la implantación del nuevo modelo de formación de las Fuerzas Armadas Españolas que otorga, junto a la titulación militar, un título de Graduado universitario en ingeniería del ámbito industrial.

Nuestros representantes justificaron - a través de una tabla que compara los contenidos del Plan de Estudios del “Graduado en Ingeniería en Organización Industrial (IOI)”, impartido por el Centro Universitario de la Defensa (CUD) de la Academia General del Aire de San Javier, con los del Plan de Estudios de la la Universidad de Zaragoza, la Universidad Politécnica de Madrid y de los Grados que habilitan a la profesión de Ingeniería Técnica

Nombre Asignatura	ECTS			
	GRADOS UPCT	GRADOS UPM	GRADO IOI (CUD-AGA)	GRADO IOI ZARAGOZA
Matemáticas	18	18	15	18
Física	12	12	12	12
Informática aplicada	6	6	6	6
Química General	6	6	6	6
Expresión Gráfica	6	6	6	6
Estadística aplicada	6	6	6	6
Organización y Gestión de Empresas	6	6	9	6
	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>
Mecánica de Fluidos	4,5	4,5	3	6
Ciencia e Ingeniería de Materiales	6	4,5	4,5	6
Tecnología Eléctrica	6	4,5	4,5	6
Análisis de Circuitos				
Máquinas Eléctricas		4,5		
Fundamentos de Electrónica Industrial	4,5	4,5		6
Teoría de Sistemas	4,5	4,5	4,5	6
Tecnología Medioambiental	4,5	3	3	6
Proyectos de Ingeniería	6	3	4,5	6
Transmisión de calor	4,5	4,5	4,5	6
Termodinámica aplicada	4,5	4,5		
Mecánica de Máquinas	6	4,5		6
Resistencia de materiales	4,5	4,5	3	6
Ingeniería de los Sistemas de Producción	4,5	4,5	6	6
Organización Industrial		4,5		6
	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>37,5</b>	<b>72</b>
Métodos cuantitativos			4,5	
Teoría de las Organizaciones			6	
Relaciones Internacionales			3	
Dirección de Operaciones			9	
Organización del Trabajo y Recursos Humanos			4,5	
			<b>27</b>	
Derecho			13,5	
Tecnología de Seguridad y Defensa			6	
Psicología en las Organizaciones			4,5	
Meteorología y Fraseología de Comunicaciones			4,5	
Prácticas en empresa			30	
			<b>58,5</b>	
Investigación operativa				12
Dirección de la producción				6
Economía de la empresa				6
Organización de RRHH				6
Calidad				6
Sistemas de información para la Dirección				6
Logística				6
Ingeniería Económica				6
Gestión de la innovación y política tecnológica				6
Liderazgo				6
				<b>66</b>
Obligatorias de especialidad	<b>73,5</b>	<b>85,5</b>		
Optativas	<b>30</b>	<b>18</b>	<b>24</b>	<b>28</b>
Inglés Técnico	4,5	4,5	21	2
Trabajo Fin de Grado	12	12	12	12
	<b>240</b>	<b>240</b>	<b>240</b>	<b>240</b>

Tabla comparativa del Plan de Estudios de IOI del CUD



# Ingeniería Industrial

Consejo de Colegios y Federación de Asociaciones de Ingeniería Industrial de España

Industrial en la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) - que dicho título no debería incorporar en su denominación los términos ingeniería industrial ni organización.

El Plan de Estudios presenta gravísimas deficiencias en el bloque de TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES, incorporando tan solo el 50% de los ECTS de estas materias con respecto a los otros planes, no cursando sus alumnos crédito alguno en asignaturas tales como MÁQUINAS ELÉCTRICAS, ELECTRÓNICA INDUSTRIAL o MECÁNICA DE MÁQUINAS; y siendo también el Plan de Estudios que menos créditos asigna al estudio de MECÁNICA DE FLUIDOS o RESISTENCIA DE MATERIALES: disciplinas consideradas todas ellas relevantes para unos alumnos que debieran conocer los principios tecnológicos de una aeronave.

También presenta una deficiente carga docente en materias propias de ORGANIZACIÓN INDUSTRIAL, incorporando tan solo 27 ECTS de estas materias frente a los 66 créditos existentes en el Plan de Estudios de IOI de la Academia Militar de Zaragoza.

Por el contrario los representantes de la ingeniería española evidenciaron la injustificada elevada carga asignada a disciplinas como INGLÉS TÉCNICO (21 ECTS frente a 4,5), DERECHO (13,5 ECTS), o 30 ECTS de PRÁCTICAS EN EMPRESAS.

Se espera que, ante este análisis, el Ministerio de Defensa modifique la denominación de dicho título, pues, en caso contrario, desde la ingeniería española nos veremos abocados a emprender una campaña publicitaria para trasladar a la sociedad española la verdadera realidad de estos estudios.

Diferencias a las que se ha añadido la denuncia del Consejo del Departamento de Expresión Gráfica de la UPCT, remitida también a nuestras instituciones, solicitando se investiguen algunos hechos acontecidos en el CUD.

## ► RECURRIDO EL TÍTULO DE GRADUADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES DE LA UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

El pasado 4 de febrero, en la sede de nuestro Colegio en Las Palmas de Gran Canaria, comparecía el Presidente de la



FAIIE para dar a conocer las acciones jurídicas iniciadas por nuestras Instituciones contra la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC) por estar ofertando, según se indicaba en su propia página web institucional, los estudios de “Graduado en Ingeniería Industrial”. Enseñanzas que venían siendo impartidas desde inicio de curso sin estar avaladas, ni por la Comunidad Autónoma, que no había autorizado su implantación, ni por el Estado, pues no constaba su inscripción en el Registro de Universidades, Títulos y Centros (RUCT). Es decir, la ULPGC se encontraba ofreciendo a sus alumnos un título jurídicamente inexistente, habiendo actuado al margen de todos los procedimientos administrativos establecidos. Ante la inexistencia de acto administrativo que pudiera ser recurrido, nuestro Consejo General se vio abocado a presentar una denuncia ante la ULPGC amparándose en la “vía de hecho”.

Inmediatamente la ULPGC procedió a eliminar de su página web la denominación de la titulación ofertada de “Graduado en Ingeniería Industrial”, sustituyéndola por la de “Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales”, mientras que la Consejería de Educación, Universidades, Cultura y Deporte del Gobierno de Canarias publicaba, en el Boletín Oficial de Canarias del 15/02/2011, un decreto autorizando la implantación de dichas enseñanzas. Actuaciones que vinieron a reconocer la existencia de los defectos administrativos denunciados por nuestro Consejo General.

Tras haber expirado el plazo estipulado en la legislación sin que la ULPGC hubiera podido cumplir todos los requisitos para que el título tuviera la condición de “oficial”, el Consejo General presentó un recurso, amparándose en una “vía de hecho”, ante el Juzgado de lo Contencioso Administrativo de Las Palmas de Gran Canaria, así como un contencioso administrativo contra el decreto de implantación de enseñanzas ante el Tribunal Superior de Justicia de Canarias.

Nuestras instituciones han decidido impugnar ese título de “Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales” por considerar que genera confusión social: título de la ULPGC que, a diferencia de los que con idéntica denominación existen en otras 20 universidades españolas -entre ellas todas las Politécnicas de este país-, habilita para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Industrial. Confusión social que los Presidentes del Consejo General y la FAIIE pudieron constatar que era compartida por el propio Director General de Política Universitaria del Ministerio de Educación quien, en la reunión mantenida el pasado 07/03/2011, afirmó, refiriéndose a este caso concreto, que, efectivamente, resultaba socialmente injustificable la existencia de títulos con idéntica denominación que, en unos casos dieran lugar a atribuciones profesionales, y en otros no. Argumento al que se suman las dudas sobre si del informe de evaluación emitido por ANECA se puede aseverar que ese plan de estudios

# Sociedad e Ingeniería

Consejo de Colegios y Federación de Asociaciones de Ingeniería Industrial de España

posibilita adquirir la íntegra totalidad de las competencias requeridas para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Industrial en su correspondiente especialidad.

Asignaturas: Grado en Ingeniería Industrial (Plan 2010)

Centro		Escuela de Ingeniería Industrial y Química		Titulación		Grado en Ingeniería Industrial		Duración		PEC	Totales
Título	Grado	Transcurrido	Obligatorio	Opcional	Libre configuración	Créditos	ECTS	6	12		
Plan de Estudios											
Ciclo I											
Primer curso											
Código	Asignaturas	Tipo	Impartición	Créd.	Estado						
42100	CÁLCULO I	Básica de rama	Semestral	6	A impartir próximamente						
42101	ALGEBRA	Básica de rama	Semestral	6	A impartir próximamente						
42102	FÍSICA I	Básica de rama	Semestral	6	A impartir próximamente						
42103	INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA	Básica de rama	Semestral	6	A impartir próximamente						
42104	INFORMÁTICA I	Básica de rama	Semestral	6	A impartir próximamente						
42105	CÁLCULO II	Básica de rama	Semestral	6	A impartir próximamente						
42106	FÍSICA II	Básica de rama	Semestral	6	A impartir próximamente						
42107	PROBLEMAS DE FÍSICA Y QUÍMICA	Básica de rama	Semestral	6	A impartir próximamente						
42108	QUÍMICA DE LOS MATERIALES	Obligatoria	Semestral	6	A impartir próximamente						
42109	INFORMÁTICA Y PROGRAMACIÓN	Básica de rama	Semestral	6	A impartir próximamente						
Segundo curso											
Código	Asignaturas	Tipo	Impartición	Créd.	Estado						
42110	MÉTODOS ESTADÍSTICOS DE LA INGENIERÍA	Básica de rama	Semestral	6	A impartir próximamente						
42111	FÍSICA III	Básica de rama	Semestral	6	A impartir próximamente						
42112	TECNOLOGÍAS DEL BIERO (LABORATORIO Y SOFTWARE BIERO)	Obligatoria	Semestral	4,5	A impartir próximamente						
42113	FUNDAMENTOS DE FABRICACIÓN Y PRODUCCIÓN	Obligatoria	Semestral	4,5	A impartir próximamente						
42114	INGENIERÍA TÉCNICA	Obligatoria	Semestral	4,5	A impartir próximamente						
42115	TECNOLOGÍA DE CIRCUITOS	Obligatoria	Semestral	4,5	A impartir próximamente						
42116	TECNOLOGÍAS DEL BIERO (LABORATORIO Y SOFTWARE BIERO II)	Obligatoria	Semestral	4,5	A impartir próximamente						
42117	TECNOLOGÍA DE MÁQUINAS Y MECANISMOS	Obligatoria	Semestral	4,5	A impartir próximamente						
42118	ELECTRÓNICA BÁSICA	Obligatoria	Semestral	4,5	A impartir próximamente						
42119	AUTOMATISMOS Y CONTROL	Obligatoria	Semestral	4,5	A impartir próximamente						
42120	RESISTENCIA DE MATERIALES	Obligatoria	Semestral	6	A impartir próximamente						

## EL CONSEJO GENERAL RECURRE UNA PLAZA DE INGENIERO DE LA EDIFICACION CONVOCADA POR EL AYUNTAMIENTO DE OGROVE

El Boletín Oficial de la Provincia de Pontevedra publicaba el 25/10/2010 las bases para la convocatoria para cubrir una plaza de “Ingeniero de la Edificación”, integrada en el grupo A1, por el sistema de concurso-oposición, reservada a funcionarios de carrera, a la que solo pueden concurrir quienes posean el título académico de “Ingeniero de la Edificación”.

Nuestro Consejo General interpuso un recurso Contencioso-Administrativo contra esta convocatoria amparándose en que, de conformidad con la Sentencia del Tribunal Supremo de 09/02/2010, la denominación de “Ingeniero de la Edificación” se encuentra anulada, no existiendo, por tanto, garantía de que en el supuesto caso de que existieran quienes pudieran poseer dicha titulación tuvieran las atribuciones necesarias para desempeñar el puesto de trabajo que se ofrece. Resulta que el título de “Ingeniero de la Edificación” es inexistente, por cuanto éste no existe ni en el Registro de Universidades, Centros y Títulos (RUCT), ni en el catálogo de títulos previos al Espacio Europeo de Educación Superior [con carácter previo a la sentencia del TS existió “Graduado en Ingeniería de la Edificación”, pero, de conformidad con lo establecido en el RD 861/2010, el término “Graduado” forma parte del título, por lo que puede afirmarse con rotundidad que nunca ha existido la titulación requerida en esta plaza].

No resulta nada difícil intuir que, por sus singulares características, ésta fue convocada con la finalidad de ascender de categoría a algún Arquitecto Técnico ya funcionario (grupo B de la Administración), quien, habiendo obtenido recientemente la titulación de “Graduado en Ingeniería de la Edificación”, pretendió emplear esta vía para ascender al grupo A, eliminando además, de paso, la posible concurrencia de Arquitectos o Ingenieros a dicho concurso.

Ante la evidente existencia de fórmulas imaginativas, que es de esperar se multipliquen ante el caos de titulaciones generado, rogamos que ante la detección de situaciones susceptibles de ser irregulares, se pongan en conocimiento de los Colegios para que éstos las trasladen al Consejo, iniciándose las pertinentes actuaciones jurídicas.

## MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL DE LUGO: RECURSO CONTRA EL PLAN DE ESTUDIOS Y DENUNCIA DE SU PROFESORADO

A los recursos contencioso-administrativos ya presentados por nuestro Consejo General ante los Tribunales Superior de

06/2010

AG4079863

ULPGC - Planes de estudio Page 2 of 4

Código	Asignaturas	Tipo	Impartición	Créd.	Estado
42121	INGENIERÍA DE CLASICO	Obligatoria	Semestral	4,5	A impartir próximamente
42122	PROBLEMAS DE FÍSICA	Obligatoria	Semestral	4,5	A impartir próximamente
42123	MATERIALES INDUSTRIALES	Obligatoria	Semestral	4,5	A impartir próximamente
42124	LABORATORIO INDUSTRIAL	Obligatoria	Semestral	4,5	A impartir próximamente

Cuarto curso

Código	Asignaturas	Tipo	Impartición	Créd.	Estado
42125	INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMATIZACIÓN	Obligatoria	Semestral	4,5	A impartir próximamente
42126	INGENIERÍA DE SISTEMAS	Obligatoria	Semestral	4,5	A impartir próximamente
42127	PROBLEMAS DE FÍSICA	Obligatoria	Semestral	4,5	A impartir próximamente
42128	MATERIALES INDUSTRIALES	Obligatoria	Semestral	4,5	A impartir próximamente
42129	LABORATORIO INDUSTRIAL	Obligatoria	Semestral	4,5	A impartir próximamente

Ámbitos de especialización/Especialidades

- INGENIERÍA INDUSTRIAL - CURSO 1
- INGENIERÍA INDUSTRIAL - CURSO 2
- INGENIERÍA INDUSTRIAL - CURSO 3
- INGENIERÍA INDUSTRIAL - CURSO 4
- INGENIERÍA INDUSTRIAL - CURSO 5
- INGENIERÍA INDUSTRIAL - CURSO 6
- INGENIERÍA INDUSTRIAL - CURSO 7
- INGENIERÍA INDUSTRIAL - CURSO 8
- INGENIERÍA INDUSTRIAL - CURSO 9
- INGENIERÍA INDUSTRIAL - CURSO 10
- INGENIERÍA INDUSTRIAL - CURSO 11
- INGENIERÍA INDUSTRIAL - CURSO 12
- INGENIERÍA INDUSTRIAL - CURSO 13
- INGENIERÍA INDUSTRIAL - CURSO 14
- INGENIERÍA INDUSTRIAL - CURSO 15
- INGENIERÍA INDUSTRIAL - CURSO 16
- INGENIERÍA INDUSTRIAL - CURSO 17
- INGENIERÍA INDUSTRIAL - CURSO 18
- INGENIERÍA INDUSTRIAL - CURSO 19
- INGENIERÍA INDUSTRIAL - CURSO 20

Certificación notarial de la existencia en la web de la ULPGC del título de “Graduado en Ingeniería Industrial”



# Ingeniería Industrial

Consejo de Colegios y Federación de Asociaciones de Ingeniería Industrial de España

Justicia de Galicia y Supremo, en referencia a los estudios de Máster en Ingeniería Industrial impartidos en la Facultad de Ciencias del Campus de Lugo de la Universidad de Santiago de Compostela (USC), se suma la incoación de un nuevo recurso contra la Resolución de la USC (BOE 11/03/2011) que publica su Plan de Estudios.

Nuestro Consejo General también ha denunciado, ante el Director General de Política Universitaria del Ministerio de Educación -en su calidad de Presidente de la Comisión Universitaria para la Regulación del Seguimiento y Acreditación (CURSA)-, y ante la Consellería de Educación e Ordenación Universitaria de la Xunta de Galicia, lo que considera el inadecuado, e ilegal, cuadro de profesorado que la USC ha asignado para la impartición docente de las asignaturas de este curso académico. Documento elaborado a partir de la información existente en la propia página web de la USC, certificada notarialmente, a los efectos de poder ser aportada como prueba en los procesos jurídicos emprendidos.

Sorprendentes resultan las áreas de conocimiento a las que pertenece el profesorado que imparte la mayoría de las asignaturas (por tan solo citar un ejemplo: el área de Ingeniería Agroforestal imparte la asignatura Tecnoloxía Eléctrica, en lugar del área de Ingeniería Eléctrica), o que el 95% del profesorado sea ajeno a la Ingeniería Industrial (Ingenieros Agrónomos: 48%, Lic. Física: 21%, Lic. Económicas:

16%, Ingeniero Caminos: 5%, Ingeniero Técnico Industrial: 5%, Ingeniero Industrial: 5%), o que la docencia de dos asignaturas (Enxeñaría Térmica y Instalacións Térmicas) se encuentren asignadas a un Ingeniero Técnico Industrial. Situación ilegal por cuanto los profesores de los Cuerpos Docentes Universitarios requieren disponer de titulación superior para poder impartir docencia en estudios de Master.

Hechos que vienen a evidenciar lo que las instituciones profesionales de la Ingeniería Industrial han venido manteniendo desde que conocieron la Memoria de Verificación de estos estudios: que la USC no disponía ni de los medios humanos ni materiales para impartirlos, desconociendo cómo ANECA pudo emitir un informe de evaluación favorable, pese a las deficiencias existentes en la propia Memoria, como así viene corroborando el transcurrir del tiempo.

El Consejo General acordó presentar ambas denuncias con la finalidad de trasladar a las autoridades competentes en política universitaria la gravedad que va adquiriendo la situación, que lleva a intuir la final anulación judicial de estos estudios, sugiriendo que quizás resultara prudente instar a su paralización cautelar, al objeto de así minimizar los perjuicios sobre unos alumnos que, considerándose damnificados, estarán en condiciones de exigir responsabilidades a las Administraciones que, por acción u omisión, han amparado la existencia y continuidad de estos estudios.

Código	Asignatura	Departamento	Área Conocimiento	Profesorado	Categoría Docente	Titulación
P4081101	Tecnoloxía Enerxética	Física Aplicada	Física Aplicada	F.F.L. E.R.N	TU CU	Físico Físico
P4081102	Tecnoloxías de Fabricación e de Máquinas	Enxeñaría Agroforestal	Enxeñaría Agroforestal	EN CONTRATACION 30/12/2010 Plaza Convocada 6002/10-11	Asociado P3	
P4081103	Sistemas Electrónicos	Electrónica e Computación	Electrónica	V.M.B.S.	Prof. Contratado Doctor	Físico
P4081104	Sistemas Automáticos	Electrónica e Computación	Electrónica	P.L.M.	Prof. Contratado Doctor	Físico
P4081105	Enxeñaría Térmica	Enxeñaría Agroforestal	Máquinas e Motores Térmicos	J.M.M.A	TEU	Ing. Técnico Industrial
P4081106	Máquinas Hidráulicas	Enxeñaría Química	Enxeñaría Química			
P4081107	Tecnoloxía Eléctrica	Enxeñaría Agroforestal	Enxeñaría Agroforestal			
P4081109	Creación e Xestión de Empresas	Organización de Empresas e Comercialización	Organización de Empresas	M.B.B.F	TU	Económicas
P4081110	Sistemas de Producción	Organización de Empresas e Comercialización	Organización de Empresas	R.M.R.C.	Contratado Interino Sustitucion	Económicas
P4081111	Organización Industrial	Organización de Empresas e Comercialización	Organización de Empresas	M.B.B.C	TU	Económicas
P4081112	Dirección de Proxectos	Enxeñaría Agroforestal	Proxectos de Enxeñaría	C.J.A.L. C.A.A.	CU Prof. Contratado Dr	Ing. Agrónomo Ing. Agrónomo
P4081113	Recursos Humanos	Organización de Empresas e Comercialización	Organización de Empresas	M.P.N.L.	TEU	Económicas
P4081115	Construción, Urbanismo e Infraestruturas	Enxeñaría Agroforestal	Enxeñaría Agroforestal	M.M.L. M.E.F.R.	TU TU	Ing. Industrial Ing. Agrónomo
P4081116	Instalacións Térmicas	Enxeñaría Agroforestal	Máquinas e Motores Térmicos	J.M.M.A	TEU	Ing. Técnico Industrial
P4081117	Estruturas Metálicas e de Formigón	Enxeñaría Agroforestal	Enxeñaría Agroforestal	M.G.F. J.P.O.S.	CU TU	Ing. Agrónomo Ing. Agrónomo
P4081118	Instalacións de Fluidos	Enxeñaría Agroforestal	Enxeñaría Hidráulica	J.G.I.R.	TU	Ing. Caminos
P4081119	Instalacións Eléctricas	Enxeñaría Agroforestal	Enxeñaría Agroforestal	M.D.F.R. M.A.G.G. M.R.R.R.R. R.V.L.S.	TU TU TU TU	Ing. Agrónomo Ing. Agrónomo Ing. Agrónomo Ing. Agrónomo
P4081120	Tecnoloxía do Transporte	Enxeñaría Agroforestal	Enxeñaría e Infraestruturas dos Transportes	EN CONTRATACION 30/12/2010 Plaza Convocada 6001/10-11	Asociado P3	

Profesorado master ingeniería industrial- lugo: curso académico 2010/2011 (v.11/03/2011)

# ¿Cómo han evolucionado los temas de nuestros artículos de investigación?

El punto de vista de los autores sobre la evolución de las conclusiones expresadas en su artículo.

## LA PREDICCIÓN DE RESULTADOS EN PROCESOS INDUSTRIALES: UNA HERRAMIENTA DE CONTROL BASADA EN EL CONOCIMIENTO

Argoitz Zabala-Uriarte (Coordinador del Proyecto PREDICAST – AZTERLAN)

Ramón Suárez-Creo (Dr. de Procesos Avanzados – AZTERLAN)

Julián Izaga-Maguregi (Dr. de Tecnología e Innovación – AZTERLAN)

Publicado en DYNA (abril 2009)

### RESUMEN DEL ARTÍCULO ORIGINAL

Son bien conocidas las dificultades que rodean la mayor parte de los procesos metalúrgicos, especialmente cuando el número de factores que interactúan en ellos es muy elevado. Los problemas son aun más importantes si deseamos predecir el comportamiento del proceso, ya que no es fácil establecer relaciones de correspondencia entre las variables críticas utilizando la información disponible. Este trabajo tiene en cuenta la existencia de varias herramientas informáticas genéricas que, con una adaptación adecuada y dotadas con el conocimiento específico, son capaces de "aprender" el proceso, de interrelacionar grandes volúmenes de datos y de predecir la calidad del producto, manteniendo al mismo tiempo el proceso bajo control. Estas herramientas gestionan la información de la planta, ayudan a obtener un proceso robusto, aumentan su conocimiento y mejoran sus resultados, afectados por el nivel de rechazos en ppm. El desarrollo de este tipo de herramientas era considerado hace algunos años como utópico. El método empleado se basa en la selección del defecto que deseamos abordar y de los parámetros o factores que gestionan el proceso. Después analizaremos las causas potenciales más probables, origen del defecto estudiado y las ordenaremos y priorizaremos con criterios probabilísticos, buscando las causas de raíz entre todas ellas. Durante la realización del proceso industrial iremos asociando, a través del programa informático, las mediciones experimentales de los factores seleccionados con los resultados obtenidos, de forma que el sistema aprenda y, al mismo tiempo, podamos desechar las variables menos significativas, mejorando de ese modo la fiabilidad de la predicción. Las conclusiones se basan en aplicaciones reales llevadas a cabo en diferentes líneas productivas, para la validación del sistema y la verificación de su eficiencia, utilizando el correspondiente índice de acierto.



## COMENTARIO ACTUAL

Argoitz Zabala Uriarte (Coordinador del Proyecto PREDICAST – AZTERLAN)

En el artículo anteriormente mencionado se presentaban los objetivos alcanzados en las pruebas experimentales para la predicción de resultados realizadas en algunas empresas de fundición. El éxito de esas aplicaciones animó a varias empresas a colaborar con AZTERLAN a través de distintos proyectos de investigación, en el desarrollo de sistemas inteligentes para el control y optimización de los procesos industriales.

En el periodo de tiempo transcurrido desde la publicación de ese artículo, se ha seguido insistiendo en la misma idea y en el desarrollo de tres líneas de trabajo principales:

**En primer lugar**, la automatización de la adquisición de los datos de proceso. Este punto se ha manifestado de vital importancia. Ya no se trata de realizar aplicaciones piloto sobre defectos o piezas concretas, sino que se pretende desarrollar sistemas inteligentes que afronten el proceso de forma integral. Para dotar al sistema inteligente de esta característica se considera fundamental automatizar al máximo posible la recopilación de los datos de producción, reduciendo a la mínima expresión los recursos humanos que deben ser destinados a la adquisición y almacenamiento de los mismos.

**En segundo lugar**, continuar adelante con el desarrollo del software basado en inteligencia artificial. Se trabaja en el desarrollo de un software sencillo en su uso, automatizado, y muy versátil. Se pretende que el software desarrollado sea adaptable a las distintas realidades existentes en las empresas de nuestro entorno industrial. La matemática aplicada y la informática avanzan de tal manera que en estos últimos años se han reconsiderado las herramientas empleadas en su diseño inicial. Gracias a la estrecha colaboración entre AZTERLAN y el S3Lab de la Universidad de Deusto con su continua y demostrada labor investigadora, el desarrollo del software considera y aplica los últimos avances en el campo de la inteligencia artificial y el razonamiento automático.

**Por último**, otra línea de trabajo que está siendo explorada es la incorporación de técnicas de inspección de piezas mediante visión artificial. Esta parte del desarrollo es especialmente interesante pensando en las líneas de producción de alta velocidad, donde la capacidad de respuesta y corrección del proceso debe ser mayor si cabe. El objetivo es identificar, localizar y catalogar los defectos encontrados en las piezas y alimentar inmediatamente al sistema inteligente con esta información. Esto posibilitará un análisis en tiempo real de la relación existente entre los parámetros de proceso y el resultado del mismo, permitiendo al sistema inteligente proponer acciones correctoras en tiempo real de fabricación.

Entre los proyectos relacionados con estas ideas que se encuentran actualmente en desarrollo destacan los siguientes:

- **Proyecto IPRO** (2010–2013), programa EUREKA-EUROSTARS.

El objetivo del proyecto consiste en el desarrollo y comercialización de un software para la gestión inteligente de procesos de fundición. La aplicación de este software permitirá a las fundiciones reducir significativamente el defectivo y los costes de fabricación asociados. Este proyecto es desarrollado por un consorcio cuyos socios son tres empresas españolas (TS Fundiciones, Fundiciones Garbi y Cofundi), dos empresas alemanas (Claasguss y Kemptener Eisengiesserei), una empresa de desarrollo de software alemana (Eidologic) y la Universidad de Kempten. AZTERLAN y la Universidad de Deusto forman parte del proyecto como empresas subcontratadas.

- **Proyecto** para "Desarrollo de un programa de visión artificial orientado a las variables de salida en el sistema de gestión integral del proceso de transformación metálica" (2009–2010). Programa EKINBERRI. Se trata de un proyecto de colaboración entre AZTERLAN y la Universidad de Deusto y ha sido financiado por la Diputación Foral de Bizkaia dentro del Plan Integral de Innovación Empresarial, área 5–2009–201.

- **Proyecto Polifemo** (2009–2011). Proyecto de investigación aplicada colaborativa entre AZTERLAN y la Universidad de Deusto, financiado por el MICINN. Consiste en el desarrollo de un sistema inteligente para la detección de errores en piezas de fundición basado en visión artificial.



## LA GESTIÓN DE LA INNOVACIÓN EN LA EMPRESA

**Antonio M. Gil Ruiz**

Dr. del Área de Innovación de Tekniker-IK4

**Gorka Varela Azkue**

Investigador del Área de Innovación de Tekniker-IK4

**Jaione Agirre Uranga**

Investigadora del área de Innovación de Tekniker-IK4

### 1. La necesidad de innovar de manera sistemática

El término “innovación” ha sido analizado desde múltiples perspectivas, siendo una de las definiciones más consagradas la que ofrece la OCDE: “No se trata de un proceso lineal, con un orden bien delimitado y un encadenamiento automático, sino de un sistema de interacciones, de idas y venidas, entre las diferentes funciones y participantes cuya experiencia y conocimientos se refuerzan mutuamente y se acumulan” (CCEE: 1995). De esta definición extraemos la importancia de las interacciones dentro la empresa, de las interacciones de la empresa con su entorno, así como de la importancia de gestionar la innovación como un proceso que requiere ser sistematizado a lo largo del tiempo, y no como una actuación puntual.

### 2. Norma UNE 166002

La serie UNE 166000 es un conjunto de normas UNE dedicadas a apoyar la optimización de la gestión de la I+D+i; concretamente, la norma UNE 166002 define los requisitos que debe cumplir un sistema de gestión de la I+D+i. La definición de “Sistema de Gestión de la Innovación (I+D+i)” s/Norma UNE 166000: “*Parte del sistema general de gestión que incluye la estructura organizativa, la planificación de las actividades, las responsabilidades, las prácticas, los procedimientos, los procesos y los recursos para desarrollar, implantar, llevar a cabo y mantener al día la política de Innovación(I+D+i) de la organización*”, luego, la norma parte de la consideración de que las actividades de I+D+i constituyen un elemento diferencial para obtener la excelencia en las organizaciones. El cumplimiento de los requisitos de esta norma es de gran ayuda en la mejora de la capacidad de las organizaciones para realizar actividades de investigación, desarrollo e innovación. Asimismo la certificación permite una demostración externa del nivel de calidad conseguido en la realización de las mismas; no obstante, la norma no instaura por si misma los criterios o las exigencias específicas de la actuación tecnológica, ni tampoco determina la profundidad o el detalle que la gestión de la innovación tecnológica ha de tener en la organización.

En este contexto, el modelo de gestión de la innovación que aquí se presenta, contribuye a acercar la empresa a la consecución de la norma UNE 166002.

### 3. Modelo de innovación

Basado en los referentes bibliográficos, pero con un enfoque operativo, orientado a cubrir las necesidades de las PYMEs para la gestión de la innovación, se ha realizado una investigación que ha proporcionado un modelo de gestión de la innovación con un enfoque de soluciones operativas para la gestión de la innovación en su dimensión empresarial con la finalidad de recoger y completar los modelos existentes. Se trata un Modelo Integral de Gestión de la Innovación Empresarial, que permite a las empresas establecer su propio sistema de Gestión de la Innovación de acuerdo a sus particularidades, desarrollando métodos que incidan en los aspectos clave para la implantación de técnicas de innovación en la empresa.

Este modelo además de encajar con la certificación de la norma UNE, cuenta con una herramienta informática de apoyo para facilitar y guiar a las pymes a la hora de crear nuevas ideas y gestionar proyectos de innovación. El Modelo de Gestión de la Innovación debe ser una representación operativa de las actividades de innovación de una empresa, por lo que, se centra en aquellos aspectos de la innovación sobre los que es posible influir e introducir cambios significativos en la forma de gestionar la misma. El objetivo principal del modelo es constituir una guía para recomendar acciones en el ámbito de la gestión de la innovación que, de acuerdo con el modelo, provoquen unos efectos determinados, tanto en la empresa como en la interacción empresa-entorno.

#### 3.1. Elementos del Modelo

Al hablar de innovación es básico comenzar haciendo referencia al Ciclo OIC (Oportunidad-Idea-Concepto), actividad de la que derivan las ideas de innovación que acabarán materializándose en los productos/servicios a ofrecer al mercado. Sin embargo, la limitación de recursos



Figura 1: Elementos del Modelo.



existente en toda empresa restringe el desarrollo de todas las ideas que puedan surgir en dicho proceso, de forma que una buena gestión de portafolio es básica para establecer prioridades y lanzar las mejores ideas que la empresa pueda asumir con los recursos disponibles. El proceso de implementación de dichas ideas también es un área en el que la innovación tiene cabida, tanto en la parte de definición del producto innovador como en la referente a su desarrollo e industrialización. Ni que decir que ninguna de estas actividades dará buenos resultados sin que exista una estrategia adecuada y definida, ni una organización apropiada que la soporte. En definitiva, se trata de áreas de innovación (que conforman los elementos del modelo) que pueden representarse de la siguiente manera:

### 3.2. Estrategia de Innovación

El establecimiento de unas estrategias claras de innovación, orientadas al mercado y a sus necesidades actuales y futuras y su posterior despliegue a toda la organización, es uno de los aspectos prioritarios de desarrollo del modelo de innovación, puesto que servirán para identificar las fuentes de vigilancia más adecuadas, seleccionar las ideas con criterio y focalizar y dirigir los esfuerzos de innovación. Por el contrario, la falta de una estrategia clara de innovación conlleva una visión cortoplacista, no orientada al mercado y sus necesidades y carente de los recursos necesarios. Lo que provoca cambios continuos en el enfoque y alcance de los proyectos de innovación. Para evitar esto, la empresa ha de visualizar la innovación como un motor fundamental de su desarrollo e incorporarla en su estrategia de negocio.

- **Organización y cultura**

La empresa debe generar el modelo de organización más adecuado para llevar a cabo las distintas estrategias de innovación, de una manera integrada en sus procesos habituales. Existen diferentes estadios de evolución y con alcances distintos, que van desde la estructuración de equipos de trabajo, u otros mecanismos de coordinación hasta la generación de unidades de gestión estables. Se deben estructurar los procesos considerando la necesidad de generar un flujo continuo de ideas y de seleccionar aquellas que permitan desarrollar adecuadamente las distintas estrategias de innovación.

- **Generación de ideas**

Las empresas “*innovativas*” han de crear un contexto en el que las ideas puedan germinar y florecer, proporcionando los medios y herramientas necesarios. Para que las ideas germinen, se han de disponer los medios que faciliten la identificación de oportunidades que puedan transformarse en ideas innovadoras, observando tanto el entorno como la propia empresa para focalizar el conocimiento generado en la identificación de oportunidades de innovación, a partir de las cuales, se generarán las ideas concretas capaces de aportar un valor añadido al cliente (bien sea interno o externo). Un aspecto diferenciador de las empresas innovadoras es su capacidad de captar señales de su entorno. De esta forma, un sistema organizado de observación y análisis del entorno,

seguida de una correcta circulación interna y utilización de la información en la empresa es la esencia del proceso de generación de ideas.

- **Selección de ideas**

La selección de ideas, o gestión del portafolio, es un proceso dinámico donde el listado de ideas a materializarse en proyectos de innovación se actualiza y renueva constantemente. Su objetivo es concretar los criterios de evaluación para seleccionar los conjuntos de ideas ganadoras, es decir, aquellas cuya materialización se estima que logra mejores resultados respecto a las inversión requerida para su desarrollo. Así, los proyectos existentes pueden ser acelerados, parados o re-priorizados, y los recursos reasignados a distintos proyectos. El proceso de selección de ideas debe ejecutarse en coherencia con las prioridades estratégicas de la organización. Dada la importancia de esta fase, se ha de evitar que el análisis y la selección de las ideas se base en percepciones personales.

- **Implementación**

Las acciones dirigidas hacia la innovación se articulan a través de proyectos, con retos de plazos, rentabilidad y resultados; por lo que el éxito en el proceso de desarrollo e implementación de las ideas y su adecuada estructuración están ligados a la aplicación de técnicas y métodos de gestión de proyectos. Los proyectos que emergen de la generación de ideas y son elegidos en la fase de selección de acuerdo a la estrategia tecnológica de la empresa y los objetivos de negocio, han de planificarse. La implementación comienza por una planificación, dónde se identifican los recursos necesarios (financieros, humanos y materiales), la secuencia de las acciones a seguir, considerando lo limitado de los recursos. Posteriormente el proyecto ha de ser ejecutado de manera controlada, considerando imprevistos. Una vez que se ejecute el proyecto, mediante la aceptación de los resultados, la conclusión y revisión del proyecto debe ser una herramienta que permita aumentar el conocimiento de la organización para proyectos futuros.

- **Entorno**

Es un elemento externo a la propia empresa y al Modelo, que a pesar de no representarlo explícitamente, se manifiesta de manera implícita en el contexto donde se desarrolla dicho modelo. El entorno incluye el mercado, realidad social, económica y empresarial en la que la empresa opera e intercambia productos/servicios y flujos de información. Ejerce su influencia sobre todos los elementos del modelo, pero más directamente sobre la estrategia de innovación.

### 3.3. Principios del Modelo

Los principios son los enfoques fundamentales de gestión, organización e innovación que, aplicados y desplegados a lo largo del tiempo, permitirán gestionar la innovación, de manera sistemática. Estos principios, se traducen en las actividades de dinamizar, orquestar y materializar la innovación dentro de la organización. De la integración de la estructura organizativa –orquestación– con los valores –dinamización–, obtendremos resultados

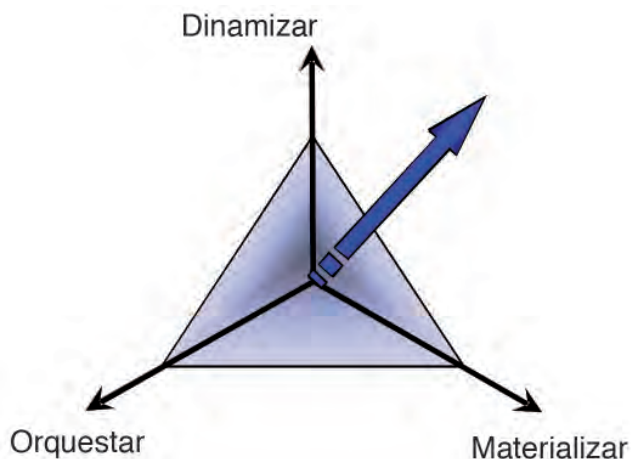


Figura 2: Los pilares o fundamentos del Modelo

sostenidos traducidos en la materialización de la innovación gracias a la ejecución de proyectos innovadores de manera sistemática.

Si bien la gestión de la innovación descansa sobre un plano formado por estos tres vectores (ver Figura 2), este plano es diferente en función de la organización considerada, adaptándose a su idiosincrasia particular, por lo que cada organización debe conformar su propio plano definiendo las actividades a realizar en los tres pilares de manera que ambos queden equilibrados. Para ello, la organización deberá definir su política de actuación en los tres pilares básicos de la innovación, dando respuesta a:

- **¿cómo dinamizar la innovación?:** Las actividades a contemplar para dinamizar la innovación dentro de la empresa son:

- Garantizar la consecución de éxitos en la ejecución de los proyectos de innovación, fundamentalmente en las primeras actuaciones.
- La difusión de los logros alcanzados por los diferentes grupos de proyecto, por lo que es necesario habilitar canales de comunicación y velar por la transparencia informativa sobre los proyectos y resultados alcanzados.
- La presión normativa por parte de la gerencia, que estimula los procesos de refuerzo y de difusión.

Esta presión se ejerce mediante políticas de incentivos y/o vigilancia, y están dirigidos a alinear los dos procesos anteriores con las políticas u objetivos trazados por la gerencia.

- **¿cómo orquestrar la innovación?:** mediante la generación de una estructura de soporte que canalice dicho proceso de manera sistemática, es decir, adecuar la organización para la innovación sistemática. Esto supone un cambio organizativo hacia estructuras flexibles, simples, integradas y que fomenten la generación y compartición de conocimiento. La innovación es favorecida en el seno de los marcos organizativos caracterizados por la existencia de un

equilibrio entre control y libertad, orden y desorden, estabilidad y cambio, así como entre centralización y descentralización. Así pues, se plantea la orquestación de estas dicotomías mediante su separación en dos planos:

- *Plano operativo dinámico* (se disuelve una vez alcanzados los objetivos por los que se ha generado) y autónomo en la definición de los cómo para la consecución de dichos objetivos;
- *Plano estratégico estable* en el cual se centraliza la generación y el control de los diferentes planos operativos de manera estructurada y alineada con la estrategia de la organización.

- **¿cómo materializar la innovación?:** la materialización de la innovación como ejecución de proyectos se organiza mediante estructuras temporales (diferentes planos operativos), que pueden involucrar tanto personal de la organización como externo. Los proyectos de innovación presentan un objetivo definido en función de un problema u oportunidad detectado por el plano estratégico, no son rutinarios implicando riesgo y cambio, y son necesariamente finitos, requiriendo una combinación temporal de recursos

## 4. Implantación del Modelo

La gestión de la innovación en la empresa puede orquestrarse mediante una estructura bidimensional que consta de dos planos, un plano estratégico y otro plano operativo. Ambos planos interactúan entre sí y a su vez con los elementos del otro plano a través de la generación de estos dos planos.

### 4.1. Plano Estratégico

Es el plano clave para la definición de las aspiraciones de la empresa en cuanto a su actividad en innovación, que tratará de desplegarse y materializarse a través del plano operativo. Las funciones atribuidas al Plano Estratégico son las siguientes:

- **Dinamizar la innovación**, inducir una cultura innovadora dentro de la organización. Para lo que deberá considerar actividades anteriormente descritas.
- **Orquestrar la innovación** en la empresa, para lo cual definirán los equipos de innovación idóneos para la materialización de cada proyecto, y les dotará de los recursos y herramientas necesarios para alcanzar su objetivo.
- **Diseñar, desarrollar y poner en marcha el plan de innovación y capacitación de la empresa.** Identificando las líneas de innovación estratégicas (proyectos de innovación) para el negocio, definiendo los equipos de innovación asociados a dichas líneas garantizando su capacitación.
- **Evaluar la capacidad de innovación de la organización**, estableciendo los planes de capacitación que se identifiquen como necesarios para que la empresa avance hacia los niveles de "empresa innovativa".



Para llevar a cabo estas funciones se genera un Comité de Innovación, que se convierte en el máximo órgano director de la innovación en la empresa, y su función consiste en definir las etapas del proceso, quién debe participar en cada una de ellas y los avances que se deben producir. También lidera la definición de focos de atención de mayor prioridad como salida de la reflexión estratégica, selecciona las iniciativas a emprender, define la composición de los equipos de proyecto de innovación, asegura el apoyo del resto de la organización a los equipos, dirige su buena marcha y se encarga de revisar la sistemática de todo el proceso para su mejora continua sostenida en el tiempo. Debido a las funciones atribuidas al Comité de Innovación, éste deberá estar formado por una parte o la totalidad del equipo directivo de la empresa, ya que deberá confeccionar la estrategia de innovación alineándola con la estrategia de la empresa.



Figura 3: Plano estratégico

#### 4.2. Plano Operativo

El plano operativo se constituye por equipos de proyecto y las características que deben contener para fomentar y apoyar la innovación son: la diversidad del equipo en términos de sus capacidades y habilidades, la cohesión social entre los miembros, la autonomía y la comunicación interna. Las responsabilidades atribuidas al Plano Operativo son:

- **Materializar la innovación** mediante la ejecución de proyectos de innovación, llevando a cabo la planificación y seguimiento de los mismos.
- **Generar soluciones** innovadoras a los retos identificados.
- **Dar respuesta a las limitaciones de conocimiento** y de la técnica dentro de las líneas de innovación identificadas.
- **Recoger y difundir las lecciones aprendidas** y el nuevo conocimiento generado.

La estructura idónea del plano operativo son los equipos de proyecto que denominaremos Equipos de Innovación. Se trata de estructuras transversales no permanentes que nacen con una finalidad concreta, y se disuelven una vez alcanzado el objetivo. La formación de equipos de innovación multidisciplinares permite la generación de conocimiento complementario a las disciplinas dominadas por cada uno de los miembros, conocimiento necesario para la innovación. Así pues, los equipos de innovación son la unidad operativa básica para la realización de los proyectos.



Figura 4: Plano operativo

Dependen de un responsable de proyecto y cuentan con representantes de los departamentos de la organización más críticos para su implantación. Disfrutan de autonomía operativa y reportan al comité de innovación. Estos equipos de innovación trabajarán en el marco de unas líneas de innovación identificadas en el plano estratégico habiendo tantos equipos de innovación como líneas estratégicas identificadas.

Luego, los equipos de innovación serán los encargados de materializar los proyectos de innovación, existiendo tantos equipos de innovación como líneas definidas en el plano estratégico. Así pues, los resultados del plano operativo son los resultados de la implementación de los proyectos de innovación y el aprendizaje asociado a todo el proceso.

#### 5. Herramientas de apoyo en la sistematización de la gestión de la innovación

La Gestión de la Innovación a través del **Modelo domINNO** tiene como complemento una herramienta informática, la cual ayuda y facilita dicha labor. Esta herramienta está dividida en tres portales:

- **Portal del Plano Estratégico**, diseñado para que lo utilice el Comité de Innovación.
- **Portal del Plano Operativo**, diseñado para apoyar a los Grupos de Proyecto.
- **Portal de Herramientas de Generación de Ideas**

#### 6. Bibliografía

- Asociación Española para la calidad. Información sobre las normas UNE1666000. Disponible en: <http://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/une-166000>
- Jasso, J. 2004. "Relevancia de la innovación y las redes institucionales". Disponible en: <http://www.aportes.buap.mx/25ap1.pdf>
- OCDE (1995): "The measurement of scientific and technological activities: manual on the measurement of human resources devoted to S&T, Canberra Manual". Paris: OCDE
- Pavitt, K. (2003): "The Process of Innovation". SPRU Electronic Working Paper Series 89, University of Sussex, SPRU - Science and Technology Policy Research
- Rosenberg, N. (1.982), "Inside the black box: Technology and Economics". Cambridge University Press.
- Rothwell, R. (1994): "The handbook of industrial innovations". Cornwall: Edward Elgar.
- Tekniker-1K4. Equipo de proyecto CTXXI (2005): "CT XXI: Investigación activa en modelos para la evolución en gestión avanzada.

## Plantas de biomasa híbridas con energía solar

Fuente: DICYT



Caldera de biomasa. • Foto: DiCYT.

La *Fundación Cartif* de Valladolid, el *Centro de Desarrollo de Energías Renovables* (Ceder) del Cimat (con sede en Lubia, Soria) y la empresa *Unisolar*, de la localidad salmantina de Béjar, han iniciado este año un proyecto de investigación que tiene por objetivo el desarrollo de una planta

híbrida con dos fuentes de energías renovables (biomasa sólida y energía solar fotovoltaica), que permita la generación de energía eléctrica y térmica para proporcionar una solución al abastecimiento energético de calidad en zonas aisladas de Iberoamérica. El proyecto, denominado **Hibrelec**, tiene un importante aspecto de cooperación al desarrollo para estas comunidades.

El trabajo se inició hace aproximadamente dos meses con la búsqueda de posibles recursos de biomasa en los tres países americanos participantes: Chile, Colombia y Cuba. El Ceder participa en el diseño del sistema de limpieza de gases involucrados en el proceso de gasificación. La investigación, en conjunto, está coordinada por la Fundación Cartif.

El sistema a desarrollar a lo largo de los dos años contemplados para la puesta a punto de una planta piloto,

estaría formado por la combinación de un módulo de gasificación de biomasa, un sistema de limpieza de gases y uno, o varios, motogeneradores de 30 a 35 kilovatios eléctricos de potencia en total, junto con otro de captación solar fotovoltaica de 5 a 10 kilovatios eléctricos, formado por un campo de paneles y un sistema de almacenamiento. En ausencia de radiación solar, funcionaría un motor impulsado por la biomasa lo que permitiría mantener la corriente eléctrica en el sistema.

El conjunto será integrado y se instalará en un contenedor en cuyas paredes y techo se ubicarán los paneles solares, consiguiéndose así que la totalidad de la instalación se pueda trasladar al lugar de demanda u orientar adecuadamente para optimizar su uso. ■

## Novedoso sistema de fabricación de tuberías de plástico

Desde el año 2006, el Grupo Cellmat (Materiales Celulares) de la Universidad de Valladolid, ubicado en el Departamento de Física de la Materia Condensada, trabaja en una línea de investigación centrada en los materiales microcelulares. Fruto de este trabajo científico, han logrado desarrollar espumas con mejores propiedades mecánicas y térmicas gracias a la incorporación de celdas más pequeñas, del orden de 50 micras, a través de una técnica denominada moldeo por autoinyección.

Fuente: DICYT



Prototipos de tubos fabricados con materiales microcelulares con base de plástico. • Foto: DICYT.

Esta técnica, que han patentado y que permite disminuir los costes tanto de materia prima como de transporte, tiene un gran

interés industrial en campos como el aislamiento térmico o acústico de edificios, el embalaje o el aligeramiento de piezas y estructuras.

Se trata de una tecnología que funciona en varias etapas. “*Primero hay que fabricar un material precursor que al dar una temperatura se expande, es algo así como hacer pan*”, señala el investigador **Miguel Ángel Rodríguez**, quien recuerda que la técnica de moldeo por autoinyección posibilita “*que los poros se hagan muy pequeños, microcelulares y poder bajar el precio de las piezas manteniendo las propiedades*”. “*Una pieza para la que se utiliza un kilogramo de plástico puede hacerse con medio kilogramo. De esta forma,*

*el coste de materia prima es menor y en el transporte también se gasta menos combustible*”, subraya. En el caso de la empresa ABN, esto supone además una ventaja medioambiental, ya que pueden gastar menos plástico para fabricar sus tuberías para conducciones hidráulicas.

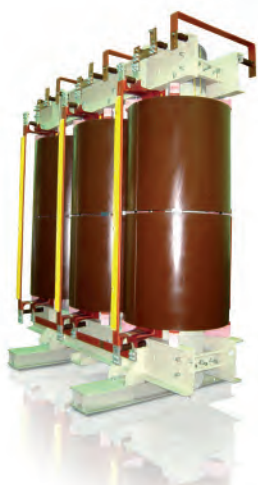
En la actualidad ya se han instalado los prototipos en la sede de Medina del Campo y se espera que a finales de 2011 esté operativa la línea de fabricación de piezas con esta tecnología.

A los beneficios de la reducción de costes de materia prima y transporte, así como a los medioambientales, se suma que la maquinaria precisa es más sencilla y económica. ■





## HiDry<sup>72</sup>, transformador seco para distribución segura y eficiente en altas tensiones (63 MVA / 72,5 kV)



Como líder mundial en tecnologías eléctricas y de automatización, ABB invierte continuamente en la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías que permiten transportar y distribuir energía eléctrica de forma cada vez más eficiente y segura. Fruto de esta investigación, y de sus más de 30 años de experiencia fabricando transformadores secos, surge la nueva gama de transformadores de hasta 63 MVA y 72,5 kV de nivel de aislamiento, una nueva alternativa ecológica, segura y rentable para aquellas aplicaciones que precisan de altas potencias y tensiones, ya sean instalaciones industriales, plantas de generación eléctrica o edificios y subestaciones eléctricas urbanas. [www.abb.es](http://www.abb.es)

## El nuevo negocio de la generación de energía por humanos

Fuente: London Press



Una idea brillante para desarrollar azulejos de pavimento que crean electricidad a partir de los pasos de personas, será puesta en marcha en un gran centro comercial en la ubicación de los Juegos Olímpicos de Londres en 2012.

Ayudar a su pueblo o ciudad, dando un paseo, podría ser una realidad en breve, según el inventor británico **Laurence Kemball-Cook**, que afirma que un adoquín en una zona transitada es “pisada” por más de 50.000 peatones todos los días. De esta forma se le ocurrió la idea de la baldosa recolectora de energía que él llama *Pavegen*.

La energía generada por las “pisadas” de los peatones podría alimentar el alumbrado público, las señales luminosas y otras utilidades urbanas cuando la gente se aproxima a ellas.

El nuevo azulejo ha ganado varios premios en el Reino Unido y su inventor ha creado una empresa para comercializarlo (<http://www.pavegen.co.uk>)

Flexionar sólo cinco milímetros, las losas Pavegen y absorber la energía cinética producida por cada paso, genera de 4-10 vatios de electricidad. La energía se almacena en las losas en una batería. La energía generada a partir de cinco losas puede iluminar una parada de autobús durante toda la noche.

Cada losa genera 2.1 vatios por hora cuando se encuentra en una zona de alta densidad de “pisadas” (un paso cada 4.10 segundos).

Las pruebas a los centros de ensayo han demostrado que cinco horas de caminata en hora punta generará energía suficiente para iluminar una parada de autobús durante 12 horas o más.

La energía es almacenada en baterías de polímero de litio. ■

## Establecido un nuevo récord de intensidad de haz en el LHC

Fuente: CERN

Los técnicos del *Gran Colisionador de Hadrones* (LHC) del Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN), cerca de la ciudad suiza de Ginebra, han logrado colisionar haces de partículas con una intensidad superior a la establecida hasta ahora por el laboratorio *Fermilab* de EE UU. El logro facilita la búsqueda del escurridizo *bosón de Higgs*.

Alrededor de la medianoche del 22 de abril el *Gran Colisionador de Hadrones* (LHC) del CERN ha establecido un nuevo récord mundial de intensidad de haz al colisionar haces con una luminosidad nunca antes alcanzada ( $4,67 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Se supera así el anterior récord de

$4,024 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  que consiguió el acelerador *Tevatron* del *Fermilab* (EE UU) en 2010, y supone un hito importante en la puesta en marcha del LHC.

La luminosidad proporciona una medida de cuantas colisiones se producen en un acelerador de partículas: cuanto mayor es la luminosidad, más partículas es probable que choquen. Este fenómeno es importante en la búsqueda de procesos poco frecuentes. Si existen las partículas de *Higgs*, por ejemplo, se producirán muy raramente, así que se requerirán gran cantidad de datos para confirmar o refutar su existencia.

La actividad actual del LHC está programada que continúe hasta final de 2012. Esto dará a los experimentos

tiempo para recopilar datos suficientes para explorar completamente el rango de energía de 3,5 teraelectronvoltios (TeV) por haz antes de preparar al gran colisionador para funcionar a mayores rangos de energía. Al final del período actual de ejecución, los científicos deberían saber si existe o no el *bosón de Higgs* (partícula elemental hipotética que predice el modelo estándar de la física de partículas).

Después de dos semanas de preparación del LHC para este nuevo nivel de intensidad de haz, la máquina está ahora en una fase de funcionamiento continuo, que está previsto dure hasta final de año. Luego se producirá una corta parada técnica, antes que se reanude la actividad en 2012. ■



# A todo VAPOR

## Los pioneros

Autor: Ignacio F. de Aguirre

Los lectores de **DYNA** que se detienen en nuestra sección “hace 80 años” habrán comprobado cómo abundaban entonces los artículos sobre las mejores técnicas para alcanzar una eficiente generación de vapor, utilizando sobre todo carbones y alguna vez gas de horno alto. En el primer tercio del siglo XX era aún la vía fundamental de la industrialización, para producir por ese medio movimiento y trabajo o para obtener electricidad mediante generadores rotativos; el petróleo y sus derivados estaban ya abriéndose paso en la automoción, aunque en proporciones inferiores.

Pero las cosas aún no han cambiado tanto, pues nuestras centrales nucleares, incluso las de última generación, también utilizan el vapor, como intermedio para la producción eléctrica, y los ciclos combinado complementan la turbina de gas con la de vapor, obtenido del calor contenido en los gases de exhaustación.

La humanidad siempre ha buscado fuentes de energía sustitutivas del esfuerzo propio o animal. Inicialmente se acudió a recursos naturales como el viento o el agua, que fueron, y de nuevo son, vectores energéticos importantes. Pero es el vapor el que marcó nuestro devenir industrial. v va

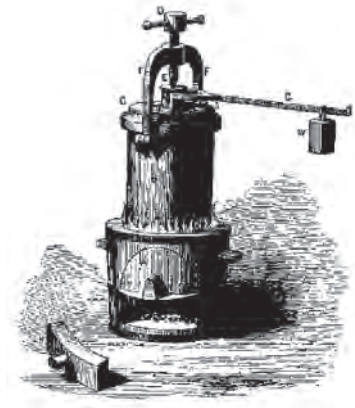


en tiempos remotos, inspiró a **Herón de Alejandría** (10 a 70 DC) su “*eolípila*”, que mostró la posibilidad de obtener movimientos giratorios aprovechando el principio de la acción – reacción, que no es otro que el utilizado por los actuales jets.

### EOLÍPILA DE HERON DE ALEJANDRÍA

Tuvieron que pasar varios siglos para encontrar algún medio técnico que aprovechara esta fuente de energía, salvo una documentada prueba del capitán de la *Armada Española*, **Blasco de Garay** que, financiado por **Carlos I**, consiguió mover unos centenares de metros, utilizando “caldera de fuego y ruedas de paletas”, al buque *Trinidad* en el puerto de Barcelona. Rechazado su proyecto por el tesorero real **Rávago**, fue desmantelado y no se supo de su fundamento, aunque todos los indicios desmienten que funcionase utilizando vapor.

Aunque muchos creen que nuestras actuales ollas a presión han sido una revolución culinaria del siglo XX, a finales del XVII, el calvinista francés **Denis Papin** (1647-1712/14), pasó a Inglaterra huyendo de la persecución religiosa, y allí presentó en 1685 su “*digestor*”, que ofrecía considerables ventajas de rapidez y eficacia en la preparación de gelatinas a partir de huesos y grasa de animales. El cierre hermético y la utilización de poca agua, producía una cocción a elevada presión y, por ende, temperatura, lo que aceleraba el proceso. El invento añadió un componente más al futuro tecnológico: para prevenir una posible explosión del artefacto, Papin incorporó la que quizá fue primera válvula de seguridad. También le tentó el gusanillo naviero y con ideas que no han dejado rastro, realizó unas pruebas



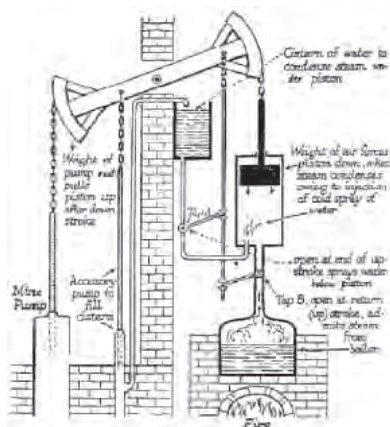
DIGESTOR DE PAPIIN

en el río Fulda (Alemania), moviendo un barco por medio de vapor, quizá utilizando cilindro y pistón, y ruedas de paletas, pero fue destruido por los airados remeros de la región que temían por sus puestos de trabajo.

Una de las operaciones que más preocupaban a la minería inglesa, primero a la de estaño y luego a la de carbón, era la frecuente inundación de pozos y galerías, con el subsiguiente trabajo de extracción por bombas aspirantes, que ocupaban gran cantidad de tiempo y mano de obra. En 1685, **Thomas Savery** patentó una máquina de extracción inyectando vapor en recipientes situados sobre la tubería de aspiración y provocando después su condensación, con lo que el vacío resultante elevaba el agua del pozo. Aunque los mecanismos ideados posteriormente se apoyaban en conceptos muy distintos, el inteligente enfoque para la redacción del texto de su patente obligó a que todo el que aplicase vapor a cualquier nuevo mecanismo tuviera que rendirle beneficios o llegar a un acuerdo.

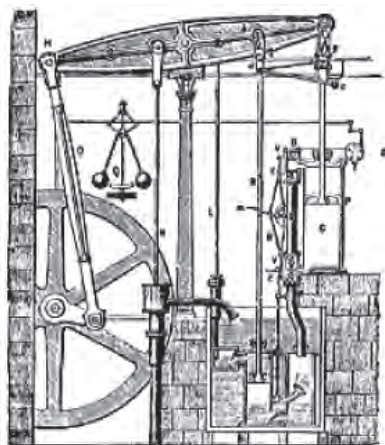
El holandés **Christian Huygens** había, en 1680, perfeccionado un sistema cilindro – pistón para funcionar con explosiones de pequeñas

cantidades de pólvora. Lógicamente su peligrosidad impidió un desarrollo efectivo, pero pudo ser la inspiración de Papin para su máquina fluvial. Sin embargo, el paso decisivo lo dio el inglés **Thomas Newcomen** que supo combinar todas las experiencias anteriores para diseñar y construir auténticas máquinas de vapor para bombas de achique, la primera en 1712, que funcionaron hasta bien entrado el siglo XIX. Aunque es verdad que tuvo que pasar por el aro de la patente de Savery, llegando con él a un amistoso acuerdo.



MÁQUINA DE NEWCOMEN

A pesar de los importantes avances conseguidos, la baja presión del vapor y el proceso para su condensación realizado en el mismo cilindro, se



MÁQUINA DE WATT

traducían en movimientos lentos y muy baja eficiencia energética. Lo primero no tenía aun fácil remedio, dado el tipo de las calderas utilizadas y la poca resistencia de los materiales empleados en los componentes metálicos, pero a lo segundo dio buena solución el mecánico, también inglés, **James Watt** (1736-1819).

En 1764, Watt, responsable de instrumentación del departamento de Física en la *Universidad de Glasgow*, supo que una máquina “newcomen” se había enviado a Londres por los usuarios para una reparación. Se hizo con ella y después de un concienzudo examen, la modificó de manera que el vapor saliese del cilindro de trabajo una vez efectuada su función y la condensación tuviese lugar en una cámara separada. Patentado en 1769, fue uno de sus tres grandes hallazgos. Los otros dos, el cilindro de doble efecto y el regulador, datan de 1780. El regulador centrífugo figura en nuestro distintivo de ingenieros industriales (ver DYNA de junio de 2009).

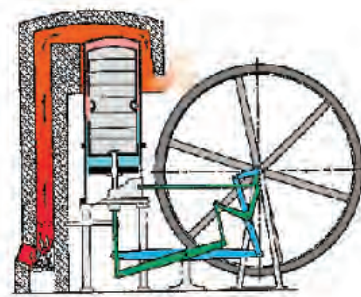
Sería impensable que, una vez disponible el más eficaz medio de producir movimiento, jamás ideado por el hombre, no se tuviese la idea de adaptarlo para el movimiento de vehículos terrestres. El “chauvinismo” francés proclama a **Jacques Cugnot** como constructor entre 1769 y 1771 de los primeros vehículos automóviles a vapor con el relevante objetivo de remolcar cañones. No es seguro su funcionamiento, aunque se sabe del accidente por descontrol que hizo fracasar la última prueba y desechar la continuación del experimento.

Fue por una apuesta con el propietario de una mina en Gales, que **Richard Trevithick**, construyó y puso en marcha en 1804 la que sería la primera locomotora del mundo, aunque las siguientes de su invención solamente se utilizaron en un pequeño circuito circular como atracción de feria, al final con escaso éxito. Tuvo que ser ya **George Stephenson** quien, 25 años más tarde, pudo ganar en Rainhill con su “*Rocket*” de caldera tubular ideada por **Booth**, el concurso

para traccionar un verdadero y veloz (45 km/h) tren moderno. Pero eso ya es otra historia.

## EPÍLOGO

El clérigo escocés Rev. **Robert Stirling** estaba sumamente preocupado por el gran número de mortales accidentes que producían las máquinas de vapor, llevando posiblemente al infierno a muchas almas sin darle la oportunidad de salvarlas. Por eso y también por su afición a la ingeniería, ideó en 1816 un revolucionario tipo de máquina térmica, que no precisaba vapor y que era la que mejor se ajustaba al posteriormente llamado “*ciclo de Carnot*”, que no fue enunciado hasta 1824.



MÁQUINA DE STIRLING

Robert Stirling estaba sumamente preocupado por el gran número de mortales accidentes que producían las máquinas de vapor



Las máquinas Stirling, tanto las construidas según el original, como las de sus numerosas variantes, no han sido precisamente un reflejo del acierto que presuponen sus fundamentos y siempre terminaban por caer en el olvido. Ha



GENERADOR SOLAR CON MOTOR STIRLING

tenido que ser una oportunidad del siglo XXI, la energía solar concentrada por espejos parabólicos la que haya recuperado este tipo de máquinas que, según sus diseñadores, obtienen una eficiencia generadora superior al de cualquier otro método de transformación.

Y así como el bueno de Papin marcó el reinicio del uso industrial del vapor con un objetivo “alimenticio”, en Suecia, **Gustaf de Laval** avanzó su último desarrollo en idéntico campo: retomó hacia 1878 la idea de la eolípila de Herón para diseñar las primeras turbinas, con el gastronómico propósito de centrifugar la leche a gran velocidad y fabricar eficientemente mantequilla. Vivir para ver.



CENTRIFUGADORA DE LAVAL

## Tecnologías clave 2015

### El estudio quinquenal de Francia

Como cada cinco años, el Ministerio de Industria, Energía y Actividades TIC, ha emitido el estudio titulado **85 TECNOLOGÍAS CLAVE 2015** que marca las características de las que a juicio del Comité que lo ha elaborado, son hacia las que debe aplicar sus mayores esfuerzos el tejido tecnológico del país a corto-medio plazo.

Se pretende que el esfuerzo realizado en llegar a disponer de esta información, adquiera el carácter de una auténtica “caja de herramientas” para uso práctico, que consiga:

- Sensibilizar el desarrollo tecnológico y valorizar los desempeños científicos y técnicos.
- Evaluar las posibilidades de los tejidos industriales actuales para buscar oportunidades de desarrollo.
- Ayudar a tomar decisiones tanto a la empresa privada como a los entes públicos, no solo en temas de I + D, sino también en la orientación de la formación, la inversión, la búsqueda de socios o colaboradores y la comercialización de los productos y la tecnología.

Unos 250 expertos de la industria, la investigación y la formación han participado en el trabajo que en esta edición cuenta con importantes novedades. La clásica división en sectores (7) se ha hecho buscando la incidencia que unos tienen sobre el desarrollo de otros, partiendo esta vez del considerado básico, como es el de QUÍMICA-MATERIALES-PROCESOS, y disponiendo como apoyo indispensable para el desarrollo de los cinco de resultados el de TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LA COMUNICACIÓN (ver gráfico).

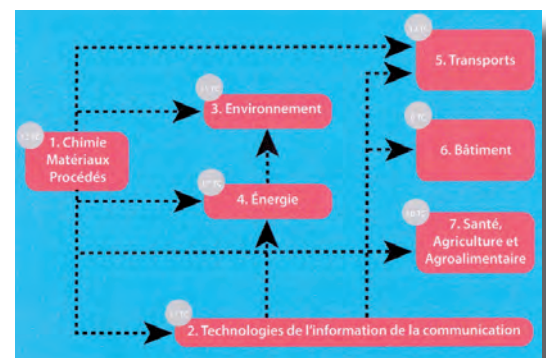
El total de 85 tecnologías clave se reparten así:

- Sector de la QUÍMICA-MATERIALES-PROCESOS, 12 tecnologías.

- Sector de TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LA COMUNICACIÓN, 17 tecnologías.
- Sector del MEDIO AMBIENTE, 11 tecnologías.
- Sector de la ENERGÍA, 17 tecnologías.
- Sector del TRANSPORTE, 12 tecnologías.
- Sector de la CONSTRUCCIÓN, 6 tecnologías.
- Sector de la SALUD, AGRICULTURA Y AGROALIMENTARIO, 10 tecnologías.

Para cada una de las tecnologías determinadas, se presenta una ficha con importantes novedades en esta edición, puesto que contiene las siguientes informaciones:

- Descripción, aplicaciones, objeto e impacto de la tecnología.
- Si la tecnología es de futuro o está ya difundida, y evaluando en qué grado lo está en el mundo y en Francia en particular.
- Posición de Francia tanto en el aspecto académico o investigación como práctico de aplicación y sus principales actores en el país, indicando el potencial existente.
- Análisis DAFO de la tecnología.
- Recomendaciones finales y relación con otras tecnologías de entre el total de las 85 seleccionadas. ■



Los interesados en consultar el documento completo, pueden hacerlo en: <http://www.industrie.gouv.fr/tc2015>



## Un sector que responde: ciencia e industria en acción.

La cita de referencia del sector químico en el sur de Europa, se transforma en el punto de encuentro a nivel internacional que impulsa y dota de valor al sector.

En esta nueva edición, **EXPOQUIMIA** concentrará los congresos y actividades paralelas clave del mundo científico, contará con zonas personalizadas diseñadas para atender a cada uno de los mercados más importantes: **COMPOSITECH**, **LAB&BIO** y así dar cabida a todas las iniciativas sectoriales.

Porque aquí es donde miles de profesionales comparten la química del mañana.



**Fira Barcelona**

**Recinto Gran Via**  
**14-18 Noviembre 2011**



**EXPOQUIMIA**

Salón Internacional de la Química

[www.expoquimia.com](http://www.expoquimia.com)

Aerolínea Oficial:

 **Spanair**

A STAR ALLIANCE MEMBER

# Libro blanco del transporte: Puesta en marcha del proyecto Green eMotion

Fuente: ENERGIA Y SOCIEDAD



El Libro Blanco del Transporte (LBT) publicado por la Comisión Europea (CE) tiene por objetivo transformar radicalmente el sistema de transportes europeo, de modo que se reduzcan drásticamente el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero en el largo plazo. El éxito de la estrategia que propone la “hoja de ruta” de la Comisión Europea sólo será posible mediante la combinación de múltiples iniciativas en diversos niveles (desarrollo de nuevas tecnologías, vehículos eléctricos, etc.). Una de estas iniciativas, actualmente en fase de investigación y desarrollo, es el proyecto *Green eMotion*, que plantea los pasos a seguir para la implantación masiva del vehículo eléctrico. A lo largo de la próxima década, la CE preparará propuestas legislativas para implementar las iniciativas identificadas en el LBT.

El sector del transporte es uno de los sectores clave para fomentar un crecimiento económico sostenible en el largo plazo en la Unión Europea (UE). Por un lado, la movilidad de personas, bienes y servicios resulta vital para desarrollar un mercado interior europeo competitivo. Por otro lado, el sector del transporte facilita el crecimiento económico y la creación de empleo. Desde la publicación del LBT de 2001 se han logrado cambios impor-

tantes en este sector, como la apertura a la competencia del transporte aéreo y por carretera y, en menor medida, por ferrocarril. Pese a ello, el desarrollo del mercado interior de transporte requiere superar barreras como la falta de integración entre los sistemas de transporte del oeste y este de la UE.

En los últimos años han irrumpido en escena dos nuevos factores con capacidad para generar un impacto muy negativo en el sector si no se gestionan adecuadamente, como la expectativa de llegar a una situación de escasez de combustibles fósiles antes de lo previsto o el calentamiento global por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Estos dos problemas tienen una solución común en lo que se refiere al sector del transporte: la sustitución de los combustibles fósiles como fuente energética. Con el objetivo de limitar el calentamiento medio del planeta en el largo plazo a 2 °C, la UE reconoce que debería alcanzarse en 2050 una reducción entre el 80% y el 95% de las emisiones GEI respecto a los niveles registrados en 1990, lo que implica una reducción del 60% en el sector del transporte. Para el año 2030, el objetivo marcado en este sector implica una reducción del 20% respecto del volumen de emisiones de 2008 (8% por encima del nivel registrado en 1990), lo que supondría un esfuerzo extraordinario de reducción de emisiones de GEI entre 2030 y 2050. No obstante, el mayor problema potencial a corto plazo es la escasez de combustibles fósiles.

En un contexto con riesgos tan diversos, el nuevo LBT de la CE traza el camino a seguir para mejorar la eficiencia energética del sector y al mismo tiempo la competitividad tecnológica europea en el ámbito global. Uno de los aspectos más destacados de la “hoja de ruta” que marca el li-

bro blanco es el *énfasis en la innovación tecnológica para la propulsión de vehículos* (aumento en la eficiencia energética y reducción de emisiones) y, consecuentemente, el desarrollo de infraestructuras y servicios necesarios para dar respaldo a las nuevas tecnologías. En este sentido, resulta vital que los esfuerzos en el ámbito europeo sean coherentes, ya que el concepto de libre transporte en el territorio de la Unión Europea podría ponerse en peligro si por ejemplo un Estado miembro decide apostar únicamente por los vehículos eléctricos y otro Estado por los que consumen biocombustibles. Los investigadores europeos deberán coordinar de forma integrada el ciclo completo de investigación, innovación e implantación de tecnologías, centrándose en aquellas más prometedoras e involucrando de forma eficaz a todas las partes interesadas.

Las tecnologías de propulsión propuestas en el LBT son motores eléctricos o modelos híbridos, que combinan un motor eléctrico con un pequeño motor suplementario de combustión interna. Debido a la menor distancia media recorrida por viaje que implica el transporte urbano y su mayor contribución a las emisiones de GEI, los primeros esfuerzos deben centrarse en este tipo de transporte, comenzando por los autobuses urbanos, los taxis y las furgonetas de transporte, así como los vehículos utilitarios de bajo peso y tamaño. El cambio en la tecnología de propulsión implica la necesidad de crear una red de recarga o sustitución de baterías y/o biocombustibles, así como sistemas de información y comunicación que permitan la integración a la red y la gestión de estos vehículos. Mediante la implementación de estas medidas, el libro blanco apunta a un objetivo de reducción del 50% de los vehículos de combustión interna uti-



lizados en el transporte urbano para 2030 y su desaparición total en 2050. Los sistemas de transporte logístico urbano deben lograr una emisión nula de CO2 en 2030.

El programa *Green Cars Initiative*, es un nuevo proyecto de 4 años de duración denominado *Green eMotion* puesto en marcha con financiación de la CE en el mes de abril de 2011 y en el que participan 42 socios procedentes de diversos ámbitos (empresas industriales y energéticas, fabricantes de automóviles, empresas de servicios públicos, ayuntamientos, universidades e instituciones de investigación y centros tecnológicos). El principal objetivo del proyecto, que tiene un presupuesto de 42 M€, es garantizar una exitosa y rápida difusión de los vehículos eléctricos, para lo cual los socios participantes intercambiarán y desarrollarán sus conocimientos y experiencias en diversas ciudades europeas, donde se utilizarán experimentalmente los vehículos, las infraestructuras de recarga y los sistemas de información y comunicación creados y se sentarán las bases

para la estandarización de tecnologías, procesos, soluciones y tecnologías de la información. Barcelona, Madrid y Málaga son las ciudades españolas que participan en el proyecto, con la instalación de casi 1.000 puntos de recarga de los 10.000 que se repartirán por toda Europa.

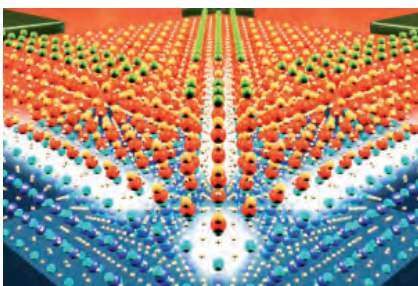
Hasta ahora, las principales barreras para la adopción del vehículo eléctrico han sido el alto coste de la batería y la escasez de puntos de recarga. En *Green eMotion* se pondrá en común la experiencia adquirida con coches, autobuses y vehículos de dos ruedas con sistemas de propulsión exclusivamente eléctricos y con vehículos híbridos. En los próximos años, será necesario crear estándares para las infraestructuras, analizar el comportamiento de las redes y trabajar en el campo de las TICs, y se abordarán aspectos especiales en algunos de los demostradores regionales como los cambios de baterías y la recarga a través de corriente continua (DC), así como la integración de redes inteligentes, el tráfico transfronterizo, diferentes sistemas de pago y el ensayo

de modelos de negocio alternativos.

La sustitución masiva de los actuales vehículos de combustión interna por vehículos eléctricos o híbridos, cuya tecnología aún no está lo suficientemente desarrollada, supone un reto científico y de coordinación internacional de proporciones desconocidas, que desembocará en la creación de nuevos mercados y modelos de negocio. Aparte de la dificultad tecnológica que entraña semejante empresa, una incógnita poco estudiada hasta ahora es el ritmo de adopción del coche eléctrico una vez desarrollada la tecnología adecuada. Los incentivos a utilizar este tipo de vehículos podrían convertirse en un problema si los costes de desarrollo de las tecnologías resultan excesivamente elevados. ■

## Nano-Transistor de electrón único

Fuente: Universidad de Pittsburg



Un transistor extremadamente pequeño y sensible podría usarse como un átomo

artificial para desarrollar materiales electrónicos inexistentes en la naturaleza.

El transistor de electrón único, detallado en la revista *Nature Nanotechnology*, ofrece un sistema de construcción para nuevas memorias de ordenador más potentes, materiales electrónicos avanzados y la base para el desarrollo del ordenador cuántico.

El componente central del transistor-una isla a sólo 1,5 nanómetros de diámetro-opera con la adición de 1 o 2 electrones.

Una virtud de este transistor de electrón único es su extrema sensibilidad a una carga eléctrica.

Otra característica de estos materiales de óxido es su ferroelectricidad, que permite que el transistor actúe como una memoria de estado sólido. El estado ferro-eléctrico puede, en ausencia de alimentación externa, controlar el número de electrones en la isla, que a su vez puede ser utilizado para representar el 1 ó 0 como bit de memoria.

Una memoria de computadora basada en esta propiedad sería capaz de conservar la información incluso cuando el procesador está apagado. El estado ferro-eléctrico también se espera que sea sensible a pequeños cambios de presión a escala nanométrica. ■

# Enfoque biomecánico para la predicción de ruptura de Aneurismas de Aorta Abdominal

Autores: Guillermo Vilalta-Alonso, Félix Nieto-Palomo, José A. Vilalta-Alonso, Carlos Vaquero-Puerta, María Ángeles Pérez-Rueda, Laurentiu Mihai-Lipsa  
 CARTIF Centro tecnológico, Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría, Hospital Clínico y Universidad de Valladolid, Instituto de las Tecnologías Avanzadas de la Producción (ITAP)

Fuente de Financiación: Ministerio de Ciencia e Innovación de España y Junta de Castilla y León.

Uno de los grandes retos al que se enfrentan los cirujanos vasculares a día de hoy, es la evaluación precisa del riesgo de ruptura de los aneurismas de aorta abdominal, lo que les permitiría tomar las decisiones más adecuadas de acuerdo al estado clínico de cada paciente y al grado de desarrollo de la patología. El actual pensamiento clínico generalizado es que la ruptura del aneurisma se pronostica monitorizando su diámetro máximo y/o su tasa de crecimiento, aconsejándose la intervención quirúrgica cuando el aneurisma alcanza 5-5.5 cm de diámetro y/o crece 0.5 cm/año. Sin embargo, se ha demostrado que estos criterios, aunque tienen una base empírica significativa, son insuficientes pues no tienen una fundamentación físicamente consistente y fallan.

Debido a esta limitación, las investigaciones se han centrado en mejorar el conocimiento y la comprensión de los procesos asociados con la evolución de los AAA, a fin de definir si otras variables pueden ser predictivas del riesgo de ruptura. La literatura comienza a reflejar la existencia de cierto consenso que, más que criterios empíricos, el desarrollo del concepto de factores biomecánicos multiniveles puede constituir un paso significativo para la evaluación precisa del riesgo de ruptura. Este nuevo enfoque tiene su fundamento en la integración, mediante relaciones apropiadas, de los factores de diferentes

naturalezas (biológica, estructural y geométrica) y escalas (temporal y dimensional) a niveles molecular, celular, de tejidos y de órganos.

La premisa básica del enfoque biomecánico para estimar el riesgo de ruptura en AAAs, es que este fenómeno sigue los principios de la falla material, o sea, un aneurisma rompe cuando las tensiones que actúan sobre la pared arterial aneurismática superan su resistencia última, reflejando la interacción existente entre el remodelado estructural de la pared arterial y la acción que sobre ésta ejerce el flujo sanguíneo.

El remodelado estructural está condicionado por las modificaciones que ocurren a nivel molecular y celular y que inciden sobre el estado material de la pared arterial lo que genera la deformación arterial (aneurisma). El surgimiento y desarrollo del AAA se asocia a la degeneración de la matriz extracelular provocada, principalmente, por la destrucción de la elastina y el colágeno, la pérdida del número de células del músculo liso, el incremento de la actividad proteolítica atribuido a la elevación en los niveles y la actividad de las metaloproteinasas, la calcificación arterial y el estrés oxidativo. La cuantificación y el peso de las variaciones temporales de estos factores se consideran a través de los *Determinantes Biomecánicos Biológicos*, cuya descripción eficiente es fundamental para establecer los modelos constitutivos de los materiales biológicos. Dichos modelos incorporan las variaciones, en el tiempo, de sus propiedades mecánicas y físicas definiendo el modelo a nivel

de tejido y representa un indicador de la capacidad de resistir la acción del flujo sanguíneo, mediante los *Biodeterminantes Estructurales*.

Por otro lado, el comportamiento del flujo sanguíneo es una consecuencia del remodelado estructural. Conceptualmente, el AAA se define como una dilatación de la aorta. De aquí que la magnitud de esta deformación, caracterizada por su morfometría y morfología, sea absolutamente relevante en la predicción del riesgo de ruptura estando demostrado que la geometría del aneurisma ejerce una significativa influencia sobre los patrones de flujo en el interior del saco aneurismático y consecuentemente sobre la distribución de las tensiones hemodinámicas (magnitud y localización de los máximos) que actúan sobre la capa íntima de la pared aneurismática. Si, debido al proceso de degeneración, la pared no puede resistir esta última acción ocurrirá, entonces, su ruptura.

El empleo del enfoque basado en el concepto de *biodeterminantes multiniveles*, proporciona un enfoque más apropiado para comprender la influencia y el rol de los diferentes procesos asociados al AAA, permitiendo, en consecuencia, mejorar la predicción de su ruptura, sobre bases personalizadas.

## Ingeniería mecánica en el siglo quince y su contribución al descubrimiento de América

Autores: JJ Prieto<sup>1</sup>, JC Fortes<sup>1</sup>, F Salguero<sup>1</sup>,  
R González-Palma<sup>2</sup>, R Esquivel<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Huelva. Escuela Superior de Ingeniería.

<sup>2</sup> Universidad de Cádiz. Escuela Superior de Ingeniería.

<sup>3</sup> Electricidad del Condado Sociedad Limitada

### 1. INTRODUCCIÓN

Existe numerosa y extensa bibliografía que hace referencia a todo lo recogido en este artículo sobre ingeniería de máquinas del Siglo XV. Esto difiere bastante si nos centramos en la parte de esta ciencia que contribuyó al descubrimiento de América, siendo este el objeto central de este trabajo.

No solo estamos ante una cuestión de arte naval, sino también ante una cuestión de ingeniería mecánica, la cual es desde el siglo XV una disciplina independiente.

Con los mecanismos utilizados y su estudio individualizado, se ha conseguido apreciar, el inestimable valor que la ingeniería mecánica aportó a esta hazaña, y sin la cual se hubiese sido complicado su éxito.

### 2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y MECANISMOS EN EL SIGLO XV

En el Siglo XV, pasamos de la Edad Media a la Edad Moderna, tomándose convencionalmente como momento de división entre ellas el año 1492 (Descubrimiento de América) o el 1453 (toma de Constantinopla por los turcos e invención de la imprenta). Entre los aspectos socio-políticos se desata la llamada Guerra de Sucesión Castellana, conflicto que se produjo en 1475 hasta 1479, por la sucesión de la Corona de Castilla, entre los partidarios de Juana, (hija del difunto monarca Enrique IV de Castilla), y los de Isabel. La guerra tuvo un marcado carácter internacional.

La Edad Media, tecnológicamente, es un periodo de cierta creatividad y de capacidad de innovar, por tanto, la aportación de las máquinas a la producción es fructífera. A la llegada del Renacimiento entre los siglos XIV y XV es cuando se produce revolución científica basada en los conocimientos e innovaciones de los siglos anteriores y estudios de mejora y renovación de los tratados árabes e incluso greco-romana.

Esta revolución científica fue un largo proceso creativo que supuso una transformación en tres áreas esenciales: la imagen del universo, la concepción de la ciencia y la metodología científica.

Se comenzaron a publicar los conocimientos de la mecánica de las máquinas considerándolos ya como una aplicación de la física, por personalidades tales como Galileo Galilei y Guidobaldo del Monte. Veamos diferentes máquinas, usadas en diferentes sectores productivos.

En el sector de la agricultura, el diseño de ciertas máquinas, permiten la mejora de sub-sectores como la lana, la harina o el vino como se muestra en el trabajo de Bautista Paz E.

En el sector de la construcción, el papel fundamental que empleaban las máquinas era el de elevación de cargas. Las obras arquitectónicas al ser cada vez más grandes necesitaron de nuevas soluciones. Cabe destacar la figura del arquitecto **Filippo Brunelleschi**, que no solo diseñaba edificios, sino



Fig. 1: Máquinas grúa de Filippo Brunelleschi, recogidas en la colección publicada por Bonaccorso Ghiberti en 1420.

que diseñaba también la maquinaria necesaria, grúas de la Figura 1, para construirlos.

Estos nuevos diseños eran adoptados inmediatamente por el gremio de los arquitectos. Otros diseños basados en poleas y tornillos son, la grúa diseñada por Da Vinci y utilizada por famosos arquitectos como Giuliano da Sangallo (figura 2a); la escalera de “De Ingensis” (figura 2b).

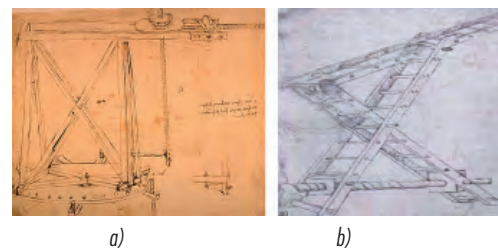


Fig. 2: a) grúa de Leonardo Da Vinci  
b) escalera de “De Ingensis”

La guerra supone también en el siglo XV un campo de suma importancia en la investigación y desarrollo de nuevas soluciones técnicas, destacando la contribución de personalidades como Leonardo da Vinci y Francesco di Giorgio.

El sector del transporte salvo varios ingenios, sigue siendo prácticamente igual que en la edad media. Por tierra se desarrolla a través de carros de tracción animal y por mar a bordo de grandes veleros. Pero el Renacimiento aporta algunas nuevas soluciones originales, como el caso de las máquinas de Ramelli del trabajo “Le Diverse et Artificiose Machine”, constituida por numerosos engranajes y poleas como puede observarse en la Figura 3.



Fig. 3: Máquinas de arrastre de Ramelli.



Todas estas maquinas nos dan una idea del “estado del arte” de la ingeniería mecánica en la época del descubrimiento, y nos ayudan a comprender los conocimientos con que contaba el artesano a la hora de equipar las naves con la mejor dotación técnica posible. El objetivo es mecanizar al máximo la nave para hacerla mas veloz, más estable y segura, y con el menor esfuerzo posible.

### 3. INGENIERÍA MECÁNICA EN LAS CARABELAS

Las Carabelas disponían de las máquinas más complejas de su tiempo, y más aún en el siglo XV español. Esta complejidad nos venia ofrecida no solo por las mejoras en su diseño y construcción, sino por los numerosos adelantos técnicos con los que estaban dotada.

Adelantos técnicos en forma de sistemas mecánicos que hacían factibles numerosas labores de abordaje y sin los cuales la historia habría sido totalmente diferente.

Estos sistemas mecánicos estaban basados principalmente en el uso de jarcias, poleas y palos, de tal forma que la nave se convierte en una estructura orgánica capaz de adaptarse a las numerosas circunstancias que un viaje transoceánico supone.

Los diferentes sistemas mecánicos con los que estaban equipados las Carabelas, se componen a su vez de diversos elementos mecánicos y mecanismos como jarcias, mástiles, vergas, poleas, polipastos, sistemas de poleas, timón, cabrestante y trinquete.

**Jarcias:** es el eslabón flexible (cuerda) encargado de la unión y desplazamiento del resto de elementos mecánicos. Puede tratarse de jarcia firme, se usa para afianzar (mástiles, velas, etc) o jarcia de labor, se usa para maniobrar o laborear (izado-arriado, etc).

**Mástiles y vergas:** junto a las jarcias, y tal y como se observa en la Figura 4, los mástiles y las vergas conforman la arboladura de la nave. Los mástiles son los palos verticales y las vergas son las

perchas perpendiculares a los mástiles. A las vergas se aseguran los grútiles de las velas, a fin de poder maniobrar con ellas de acuerdo con el viento. Reciben el nombre del mástil en el que van.

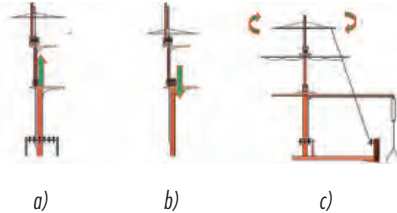


Fig. 4: Esquema de las principales funciones de la jarcia de labor. a) izado de vergas, b) bajada de las vergas, c) orientación de las velas.

**Poleas o motones:** como podemos ver en la Figura 5a y 5b, las poleas se componen de dos aberturas donde se atan las jarcias además de una rueda interior para redireccionar la fuerza ejercida mediante las jarcias. Una polea por si misma no supone ventaja mecánica alguna, esto se consigue mediante la unión de dos o mas poleas formando un sistema de poleas como se ve en la Figura 5b.

Distinguimos entre dos formas de usar estas poleas y así formar mecanismos de varias poleas sencillas. La primera de las formas sería la utilizada en la Figura 5b, la polea va fijada por uno de sus extremos mientras que a través de su rueda central redirecciona la fuerza. La segunda de las formas es la que se ve en la Figura 5a, en la que la polea va fijada de un extremo mientras que el otro extremo, tras pasar por otra polea, regresa para pasar por su rueda central. Esto puede observarse mejor en la Figura 5c. Este segundo tipo de polea al conformar junto con la primera un sistema mecánico, conlleva la ansiada ventaja mecánica.

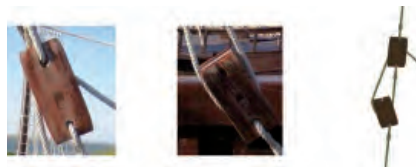


Fig. 5: a) y b) reconstrucción de polea de la Nao Santa María, c) sistema mecánico formado por la unión de dos poleas.

Estos sistemas de poleas se unen a otros eslabones y/o mecanismos para formar diversos sistemas mecánicos como por ejemplo el sistema encargado de alinear las vergas. Este sistema, tal y como se muestra en las Figuras 6 y 7, está formado por jarcia de labor y sistemas de poleas. Su función es alinear las vergas con respecto al mástil a fin de alinear a su vez las velas atadas a éstas.

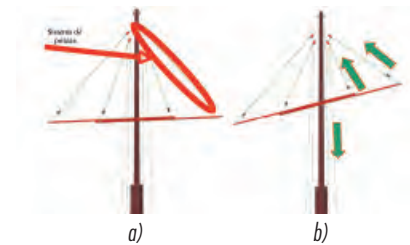


Fig. 6: a) reconstrucción del sistema de alineación de verga, b) sistema con verga inclinada con respecto al mástil.



Fig. 7: Sistemas de poleas en Verga del palo mayor de la Nao Santa María en el Muelle de Palos.

Otro sistema mecánico que hace uso de estos sistemas de poleas es el encargado del equilibrado de mástiles. Este sistema esta formado, como se aprecia en la Figura 8, por un conjunto de jarcias (firmes y de labor) y sistemas de poleas. El sistema realiza el trabajo de mantener el mástil adecuadamente erguido.

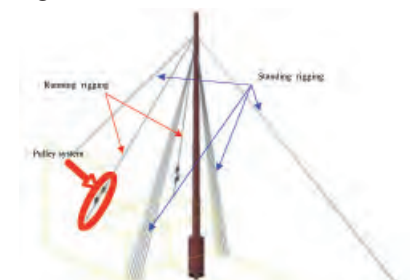


Fig. 8: Reconstrucción del sistema de equilibrado del mástil de las Carabelas.

# Colaboración

La mayoría de las labores de velas y vergas en las Carabelas y en la Nao Santa María son resueltas con sistemas formados por poleas simples. Sin embargo en la Nao nos encontramos con un sistema mecánico más complejo que los anteriores compuesto por polipastos.

Los polipastos o cuadernales son mecanismos resultantes de la unión de dos o más poleas formando una sola pieza. Estas poleas se pueden distribuir horizontalmente como se muestra en las Figuras 9a y 9b, o verticalmente una encima de la otra tal y como se ve en las Figuras 9c y 9d.

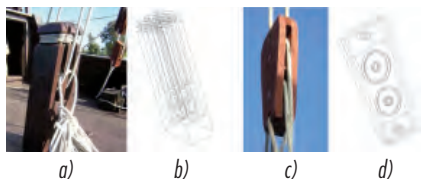


Fig. 9: a) reconstrucción de un polipasto en horizontal b) dibujo que muestra el interior de las ruedas de un polipasto en horizontal c) reconstrucción de polipasto en vertical d) dibujo que muestra el interior de las ruedas de un polipasto en vertical.

En el caso de la Nao Santan María, nos encontramos con un sistema mecánico formado por un polipasto en vertical y otro en horizontal, tal y como se representa en la Figura 10. El polipasto en horizontal va atado al casco y lleva a cabo la labor de redirigir las fuerzas ejercidas por las jarcias. El polipasto en vertical resulta ser móvil, sube al soltar la jarcia y baja al tirar de ella. Unido al anterior se consigue la ventaja mecánica necesaria para izar el palo mayor de la nave.

Nos encontramos aquí frente a un complejo sistema mecánico en el que intervienen palos, vergas, jarcias, polipastos y poleas simples.

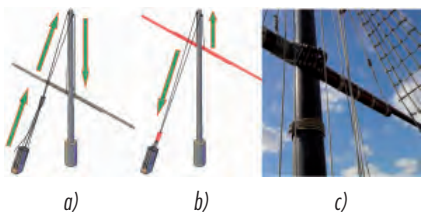


Fig. 10: a) Reconstrucción del sistema mecánico en el trabajo de elevación del palo mayor. b) descenso del palo mayor (las partes móviles están en rojo) c) Verga del palo mayor de la Nao Santa María en el Muelle de Palos.

Otro mecanismo de gran utilidad del que iban provistas las Carabelas es el cabestrante. El cabestrante, tal y como podemos observar en la Figura 11, consiste en un rodillo de madera giratorio al que, mediante dos barras cruzadas, se le aplica la fuerza necesaria para subir el ancla o mover alguna otra carga. Ofrece la ventaja mecánica propia del momento de fuerzas de las barras y además da la oportunidad de que cuatro marineros se sumen a la tarea de hacerlo girar.

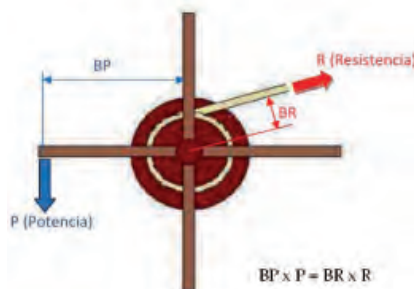


Fig. 11: esquema cinemático del cabestrante.

El trinquete, del cual vemos una representación en la Figura 12a, consiste en una rueda dentada que se une al cuerpo del cabestrante. Mediante el sistema de retención, Figura 12b se imposibilita la rotación entre el trinquete y el cabestrante.

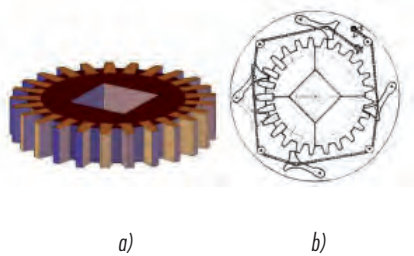


Fig. 12: a) representación 3d del trinquete. b) ilustración de un sistema de retención

Cabestrante, trinquete, sistema de retención, jarcias y cargas se unen para formar un elaborado sistema mecánico, como el mostrado en la Figura 13. Este sistema se usa cuando no es suficiente con la ventaja mecánica que ofrecen los mecanismos a base de poleas solamente, como por ejemplo,

elevant cargas a bordo, elevar el ancla y a veces ayudar en la labor de tirar de otras jarcias como la necesaria para izar la verga en el palo mayor.

Con la ayuda del cabestrante, cuatro hombres podían levantar los 10 quintales que pesan el ancla y su cable en una Carabela.

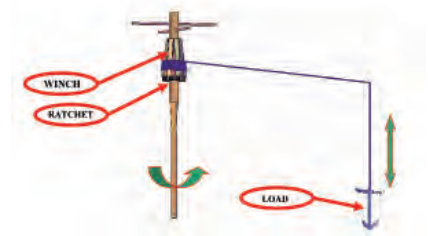


Fig.13: Representación en 3d del sistema mecánico de elevación de cargas en el trabajo del izado del ancla.

## 4. RESULTADO Y CONCLUSIONES

Percibimos que al estudiar las naves del descubrimiento, no solo nos enfrentamos a una cuestión de arte naval, sino también a una cuestión de ingeniería mecánica, la cual es desde el siglo XV una disciplina independiente, como ya expuso Galileo Galilei en su obra *Le Meccaniche*.

Con la diferenciación de estos mecanismos y su estudio individualizado, se ha conseguido apreciar el inestimable valor que la ingeniería mecánica aportó a ésta hazaña, y sin la cual se comprende harto complicado su éxito.

Así también, se observa, que sin la aplicación adecuada y una admirable destreza en la manejabilidad de estos sistemas mecánicos, hubiese sido muy difícil la consecución de éste histórico punto de inflexión.

Por otro lado, se entiende que muchos conocimientos técnicos (diseño, construcción, etc.) se han ido perdiendo, dado que su transmisión era exclusivamente verbal. Se puede concluir, por tanto, que la investigación sobre los aspectos de ingeniería de estos navíos están aún por desvelar en gran medida. Estos secretos probablemente no se encuentren en ningún libro, y sus principales conocedores seguirán siendo viejos artesanos.

# Ingeniería de control y protección de subestaciones eléctricas



Javier Orejas\*  
Sergio Martínez \*\*

Ingeniero Industrial  
Dr. Ingeniero Industrial

\* ZIV Aplicaciones y Tecnología. Parque Tecnológico de Leganés. C/ Diego Martín Aguilera, 14 - 28918 Leganés (Madrid). Tfno: +34 913 527056. javiorejas@hotmail.com

\*\* Universidad Politécnica de Madrid. ETSI Industriales. C/ José Gutiérrez Abascal, 2 - 28006 Madrid. Tfno: +34 913 363025. sergio.martinez@upm.es

Recibido: 26/10/2010 • Aceptado: 21/03/2011

## Control and protection engineering of electrical substations

### ABSTRACT

- This paper presents the results of a review on different engineering projects for the control and relaying of electrical substations. A general introduction to substations and their functions within a power system is given, along with a description of their control system and philosophy. In the work, different projects have been analyzed and, as a result, the study has identified the aspects to be considered in a good engineering project, adapted to today's complex requirements on the automation and relaying of electrical substations, and the documentation to include. The paper concludes with a discussion on future developments in the control engineering of these facilities.
- **Keywords:** automation, control, relaying, engineering project, electrical substation.

### RESUMEN

Este artículo presenta los resultados de un trabajo de revisión de distintos proyectos de ingeniería de control y protección de subestaciones eléctricas. En primer lugar, se hace una introducción general sobre las subestaciones y sus funciones dentro de un sistema de energía eléctrica, y se describe su sistema y filosofía de control. Posteriormente, se presentan los resultados de la revisión en la que, tras estudiar diferentes proyectos, se han identificado los aspectos a tener en cuenta para la realización de un buen proyecto de ingeniería, adaptado a las complejas necesidades actuales de automatización y protección de subestaciones eléctricas, así como la documentación a incluir. Se concluye con un análisis de la evolución futura de la ingeniería de control de estas instalaciones.

**Palabras claves:** automatización, control, protección, proyecto de ingeniería, subestación eléctrica

### 1. INTRODUCCIÓN

Un Sistema Eléctrico de Potencia o Sistema de Energía Eléctrica es el “conjunto de todas las instalaciones electrotécnicas,

redes incluidas, y todas las instalaciones adicionales para la generación, transporte y utilización de la energía eléctrica dentro de una determinada unidad territorial” (Mujal-Rosas, 2003). De acuerdo con esta definición, la misión de un Sistema Eléctrico de Potencia es suministrar energía eléctrica a los consumidores que la demandan dentro de una determinada zona geográfica. Adicionalmente, este suministro se debe realizar cumpliendo con unas condiciones de seguridad, de calidad y medioambientales adecuadas, con el mínimo coste posible.

Las subestaciones son uno de los elementos fundamentales dentro de un Sistema de Energía Eléctrica. En ellas se realizan los seccionamientos de la red, las interconexiones de los distintos sistemas y las elevaciones o reducciones de los niveles de tensión para adecuarlos a los valores necesarios en cada caso. Aparte de completar las funciones propias de la operación de los sistemas eléctricos, en las subestaciones se instalan dispositivos de medida y de protección contra las variaciones de tensión, sobre-intensidades, variaciones de frecuencia, así como de protección de los propios equipos eléctricos instalados (transformadores, baterías de condensadores, líneas de alimentación y



de salida...). La Tabla 1 resume las funciones principales de una subestación (Kezunovic, et al., 2010).

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transformación entre niveles de tensión</li> <li>• Conexión de líneas de transporte</li> <li>• Configuración de topologías de red</li> <li>• Punto de monitorización para centro de control</li> <li>• Protección de líneas y equipos eléctricos</li> <li>• Comunicación con otras subestaciones y el centro de control</li> </ul> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Tabla 1: Principales funciones de las subestaciones (Kezunovic, et al., 2010)

Para su adecuado funcionamiento, una subestación se encuentra dividida en niveles de tensión, repartidos en sistemas de barras (conductores), en cada cual coexisten distintos elementos, llamados posiciones. Estos son, generalmente: líneas, transformadores de potencia, transformadores de servicios auxiliares, enlaces de barras, particiones de barras y baterías de condensadores. La automatización de las subestaciones es la herramienta que permite asumir las cada vez mayores exigencias de la red eléctrica en cuanto a garantía de calidad de suministro a los consumidores (Sánchez-Ruiz, 2009). La existencia del sistema de regulación y protección permite controlar la funcionalidad y seguridad de las maniobras y los eventos que van sucediendo en la red, con ventajas añadidas como su contribución a la integración de las nuevas formas de generación eléctrica en las redes de distribución, p.e. (Niknam, et al., 2010), y posibilitar la operación de dichas redes en condiciones extremas (Chowdhury, et al., 2009).

El objetivo de este artículo es doble. Por una parte, divulgativo, para lo que se presenta una introducción general sobre las subestaciones eléctricas y su ingeniería de control y protección (apartados 1 y 2), con el fin de que un ingeniero con interés en el tema, pero sin una formación especializada previa, pueda acercarse a este campo. Por otra parte, el artículo presenta los resultados de un trabajo de investigación sobre las características que debe reunir un proyecto de ingeniería de control y protección de subestaciones eléctricas para que contemple adecuadamente las necesidades actuales de automatización y protección de estas instalaciones. En este trabajo se han estudiado distintos proyectos de ingeniería, ya ejecutados, para identificar sus características comunes y sus posibles carencias. Como resultado, en el artículo se describen los aspectos a tener en cuenta en los citados proyectos (apartado 3), así como la documentación a incluir (apartado 4). Aparte de estos resultados, se incluye información sobre la previsible evolución futura en este campo (apartado 5).

## 2. EL CONTROL DE UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA: RTU Y SIPCO

### 2.1. CONTROL BASADO EN RTU

El elemento básico de control de subestaciones es, desde hace más de dos décadas, la denominada Unidad Terminal Remota, RTU (por sus iniciales en inglés: *Remote Terminal Unit*). Este equipo recoge y envía las distintas señales de órdenes y estados al despacho (telemando) y permite el gobierno remoto de la subestación sin requerir la presencia de personal en la misma. La RTU es un Controlador Lógico Programable, PLC (por sus iniciales en inglés: *Programmable Logic Controller*), con comunicación con el exterior, denominado Telemando. Los equipos eléctricos de una subestación se pueden agrupar en las siguientes categorías:

- Aparamenta: Elementos de maniobra (seccionadores, interruptores...).
- Posición: Conjunto de elementos que conforman una unidad en las que se divide una subestación (línea, transformador, barras y batería de condensadores) y que requieren un control.
- Protección: Que garantice el resguardo de los equipos ante fallos eléctricos, la reposición del servicio eléctrico tan rápido como sea posible y la seguridad ante daños a personas.
- Medida: De tensión, intensidad, potencia, factor de potencia...

El equipo RTU gestiona todas las señales de la subestación. Su esquema funcional se representa en la Figura 1. Tiene tarjetas que reciben entradas digitales (estados y alarmas), salidas digitales (mandos) y medidas (analógicas de medida directa o por convertidor). Y emite todas estas señales a través de una tarjeta de comunicaciones al telemando. Además, posee una unidad central de proceso que tiene programada toda la lógica de control de la subestación. Con el sistema de regulación basado en RTU, todos los eventos, órdenes y estados de la subestación están implementados en el mismo equipo; de modo que si se produce un fallo en la RTU, queda fuera de operación todo el control sobre las posiciones, salvo su intervención directa de forma manual.

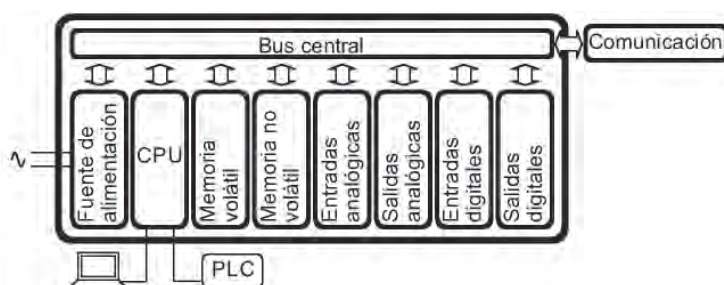


Fig. 1: Esquema funcional de un equipo RTU

## 2.2. CONTROL BASADO EN SIPCO

En la última década del siglo pasado, se comenzó a introducir lo que actualmente se conoce como Sistema Integrado de Protección y Control (SIPCO). Éste fragmenta la subestación en varios niveles:

- Nivel 0: Aparamenta y equipos primarios
- Nivel 1: Posición (UCP o LOCAL)
- Nivel 2: Subestación (UCS o CUADRO)
- Nivel 3: Telemando

En esta estructura, los niveles 1, 2 y 3 son de mando. Según esta idea, habría que añadir al término SIPCO la característica de “distribuido”. Las señales de cada posición son recogidas por su propio PLC, que recibe el nombre de Unidad de Control de Posición (UCP). Las UCP se comunican con la Unidad de Control de Subestación (UCS), que agrupa toda la información llegada de las posiciones. Mediante un sistema de control supervisor y de adquisición de datos, SCADA (por sus iniciales en inglés: *Supervisory Control And Data Acquisition*) (Ostojic, et al., 2010), la UCS permite conocer el estado de la subestación, realizar órdenes y verificar las alarmas disparadas de una forma centralizada. La UCS realiza la comunicación de las posiciones entre sí y entre ellas y el telemando. La Figura 2 ilustra de forma gráfica el concepto de SIPCO.

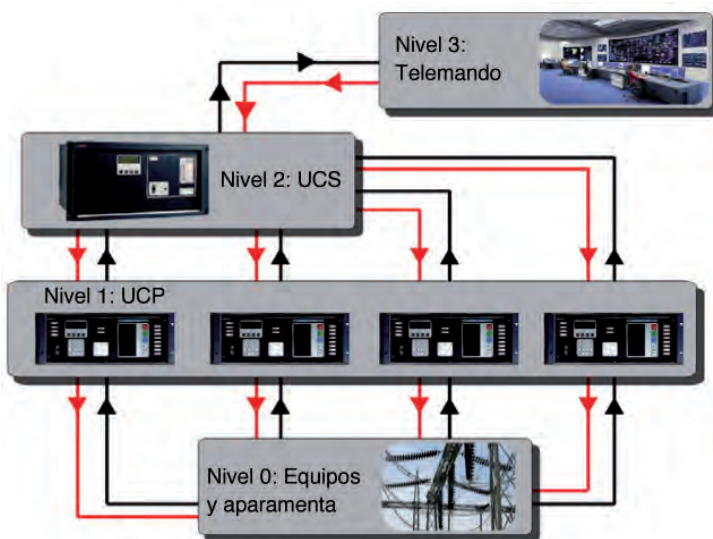


Fig. 2: Representación esquemática de un SIPCO

Como principales ventajas del SIPCO frente al control por RTU, se puede destacar que: el fallo de una UCP no implica la pérdida de control remoto sobre el resto de posiciones; y, al disponer de más equipos, hay mayor capacidad para recibir señales de entrada y se puede aportar una mayor información a comunicar al telemando, proporcionando un mayor detalle de la situación que pueda acontecer en la subestación. Por ello, en la regulación de las subestaciones actuales se utiliza un SIPCO, en el que las funciones de protección y control trabajan de una manera coordinada.

En el mercado, hay diferentes soluciones para SIPCO. Independientemente del fabricante, en general, se puede decir que cada posición es gobernada por un relé de control, UCP, que recoge las entradas de campo de dicha posición, las señales provenientes de la parte de protección, realiza mediciones, define el estado de los elementos que la conforman y se comunica con el resto de UCP de la subestación. La comunicación entre posiciones la lleva a cabo la UCS, la cual recoge los datos emitidos por cada una de ellas y selecciona la información que debe reenviar a los distintos puntos. Asimismo, en la UCS quedan centralizados todos los estados y sucesos que pudieran acontecer en la subestación. La UCS, puede ser intervenida desde un despacho externo y, por lo tanto, permite la posibilidad de gobernar la subestación a distancia. Como ejemplo, de acuerdo con (Iberdrola, 2003), las funciones principales de la unidad de control de subestación son:

- Mando y Señalización de todas las posiciones de la subestación.
- Ejecución de Automatismos de nivel general a nivel subestación.
- Presentación y Gestión de las alarmas del sistema.
- Gestión de las comunicaciones con el sistema de Telecontrol.
- Gestión de las comunicaciones con todas las unidades de control de posición.
- Gestión de periféricos: teclado de operación, impresora, etc.
- Gestión de informes.
- Gestión de comunicaciones con un centro remoto de adquisición de información.

## 3. INGENIERÍA DE CONTROL DE SUBESTACIONES MEDIANTE SIPCO

La ingeniería de control de subestaciones mediante SIPCO se encarga de definir los relés de control mencionados anteriormente de modo que puedan satisfacer las necesidades requeridas para una óptima regulación.

### 3.1. ORDENAMIENTO JERÁRQUICO DE COMUNICACIONES Y ÓRDENES EN SIPCO

Como se ha indicado anteriormente, un SIPCO posee cuatro niveles jerárquicos: Aparamenta, UCP, UCS y Telemando. La transmisión de estados y medidas se realiza mediante una comunicación en dirección vertical. Todo lo que sucede en la aparamenta y los equipos primarios de cada posición (estados del interruptor, seccionadores, habilitación de protecciones, presencia de tensión, medidas de tensión, corriente y potencias...) se transmite mediante señales digitales a su correspondiente UCP (este nivel recibe también el nombre de LOCAL). Cada UCP, comunica a la UCS de la subestación estos sucesos por fibra óptica. La UCS, reuniendo la información de todas las UCP, la envía al telemando. El esquema jerárquico de comunicación



ascendente es el representado por las líneas de color negro de la Figura 2.

El SIPCO establece, entre los tres niveles de mando, dos niveles básicos de estado, de modo que la activación de uno de ellos, implica la desactivación del otro. Estos son el Telemando y el nivel local (o de UCP). El nivel de la UCS podrá estar o no activo independientemente del estado de los otros dos niveles de mando.

Por motivos de seguridad, si la subestación se encuentra en estado local, nadie desde el despacho debe poder realizar ningún mando sobre la subestación. El estado telemando sólo estará disponible si el operador que se encuentra físicamente en la instalación así lo habilita, desactivando en ese instante el control local. Para activar de nuevo el gobierno de la subestación en modo local, es preciso que el operador presente en la subestación deshabilite el estado remoto. Se establece así una filosofía jerárquica de mandos cuyas principales premisas son:

- Si el telemando está activo, es decir, está habilitado para realizar órdenes sobre la apartament, no progresará ninguna orden de los niveles inferiores (aunque el nivel UCS esté habilitado), tal como se representa en la Figura 3.

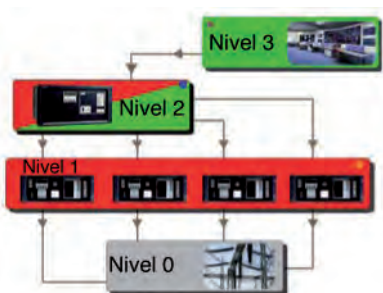


Fig. 3: SIPCO con telemando activado, con independencia del estado del nivel de UCS.

- Un nivel inferior, puede siempre deshabilitar a un nivel superior (desactivarlo). En el caso de la UCS, para que sus órdenes puedan progresar, debe desactivar el telemando, siempre que antes haya sido activado por el nivel de UCP. Esto se traduce en que si el SIPCO está en nivel de telemando (por lo que no estará en nivel de UCP), el nivel UCP no podrá actuar sobre la subestación, a menos que primero desactive el estado de telemando (véase la Figura 4).

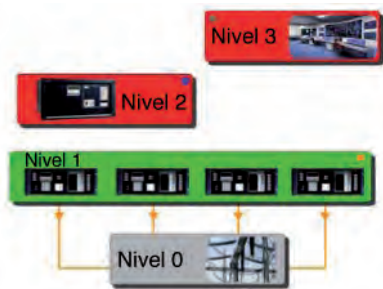


Fig. 4: SIPCO con nivel UCP activado.

- Si los niveles UCS y UCP están habilitados, progresarán las órdenes de ambos niveles (véase la Figura 5).

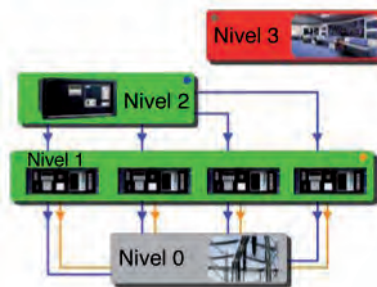


Fig. 5: SIPCO con UCS y LOCAL activados o habilitados.

### 3.2. ASPECTOS CLAVES EN LA INGENIERÍA DE CONTROL DE SUBESTACIONES

Se ha llevado a cabo un análisis sobre diferentes proyectos de ingeniería de control de subestaciones que ha permitido identificar los aspectos claves a tener en cuenta para la realización de un buen proyecto, adecuado a las complejas necesidades actuales. A continuación, se enumeran y describen brevemente dichos aspectos.

- Cableado de las entradas y salidas digitales y definición de las distintas señales. La ingeniería previa a la configuración del equipo de control establece qué señales deben llegar a cada relé de control, ya sean entradas de campo, entradas desde la parte de protección, escrituras a través de fibra óptica desde la UCS, órdenes locales o telemandadas y entradas de medida. También establece qué señales, tras su paso por la lógica, deben cablearse como salidas digitales.
- Lógica de estados y bloqueos basada en las señales de entrada. La programación del control de una subestación consiste en aplicar una lógica de bloqueos, permisos, definición de estados de los distintos elementos que la componen, comunicación de todos los eventos que sucedan... Esto se puede realizar a través de la aplicación de unas fichas lógicas, en las que se utilizan los algoritmos lógicos comunes (puertas AND, OR, biestables, temporizadores, pulsadores...) y se tratan las diferentes señales entrantes de forma que el gobierno de la subestación quede supeditado, según las posibilidades de maniobras eléctricas seguras, a los criterios y filosofía de seguridad y mando que se deseen ejecutar.
- Configuración de los ajustes de los parámetros lógicos. Todo el control se ve afectado por la variable del tiempo, de modo que la activación de alarmas y bloqueos depende de la permanencia temporal de determinadas señales en su estado

activado o desactivado. La configuración debe especificar los diferentes ajustes que miden el proceso de estado de la posición, estableciendo para todos ellos un rango y un valor temporal por defecto que, una vez cargada la configuración en el relé de control y realizada su puesta en servicio en campo, pueda modificarse dentro del rango impuesto en la programación.

- Armonización entre las señales de entrada, las generadas por la lógica interna y las salidas. Durante el proceso de la configuración son numerosas las variables que entran en juego. Para una correcta manipulación de los datos, se debe realizar una asignación rigurosa y metódica entre las entradas y las variables lógicas creadas, y entre estas últimas y las salidas de campo.
- Definición de la interfaz con el operador. Debe ser una interfaz cómoda que, supeditada a la lógica de estados y bloqueos previamente programada, posibilite la maniobrabilidad y mando al operador de la subestación sobre la posición. Por ejemplo, los equipos pueden presentar una pantalla con el esquema unifilar de la posición que controlan. Esta pantalla permite seleccionar de forma interactiva los elementos maniobrables y actuar sobre ellos. El relé de control traduce estas órdenes y emite a campo los mandos correspondientes que lleven a cabo lo demandado por el operador a través de la pantalla.
- Definición de alarmas. Se deben definir las alarmas a emitir como consecuencia de situaciones que así lo requieran y que puedan acaecer durante el funcionamiento de los elementos y la aparataje de la posición. Las señales generadas en lógica pueden configurarse de modo que generen alarma en su activación y puedan ser reconocidas por el operario en campo.
- Establecimiento de un método de comunicación con la UCS. Debe permitir conocer el estado completo de cada posición y poder gestionar la información recibida fruto del diálogo con el resto de posiciones. Dado que la UCS y las UCP pueden ser de fabricantes diferentes, se debe emplear un protocolo de comunicaciones normalizado, por ejemplo PROCOME (Amantegui, et al., 2005).

#### 4. DOCUMENTACIÓN DE LA LÓGICA DE CONTROL PARA SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

Existen varias filosofías de control de subestaciones mediante SIPCO (según los distintos criterios elegidos,

sistemas de comunicación, intereses y prioridades de protección, grado de información requerida...) que hacen que la definición de la lógica sea variable. A pesar de esto, es posible desarrollar una configuración básica genérica que permita su modificación de forma flexible y poder satisfacer las necesidades particulares de cada caso.

La ingeniería de control se ocupa de desarrollar estas directrices de forma completa y generar una documentación que permita al configurador programar la lógica que más tarde se volcará en las UCP. En esta documentación se deben establecer todos los criterios, bloqueos, mandos y comunicaciones a implementar. Toda esta información establece las condiciones que se deben cumplir en la política de explotación de la subestación y se convierte en la herramienta básica de este proceso, de ahí la importancia de su completa definición. A continuación se describen los documentos necesarios para el proyecto.

##### 4.1. ESQUEMAS UNIFILARES GENERALES

Los planos unifilares necesarios para la realización de una configuración lógica pueden ser de dos categorías:

- Unifilar general simplificado. Se define toda la estructura de conductores de potencia de la subestación, pero no aparecen ni los equipos de control que gobiernan cada posición ni sus protecciones. Es el primero de los planos, ya que describe de forma sencilla y esquemática las partes de la subestación.
- Unifilar general desarrollado. Refleja sólo un nivel de tensión. De menor relación de escala que el simplificado, permite un mayor detalle de definición. En él se especifica el tipo y modelo de los equipos de control, fabricante y valores nominales de las protecciones. Este unifilar presenta además de las líneas correspondientes a las barras y conductores de potencia, otro tipo de líneas, que indican sobre qué elementos actúan las protecciones o los relés de control a través de su unión a los distintos dispositivos de la aparataje.

##### 4.2. LISTADO DE SEÑALES DE CAMPO POR POSICIÓN

- Entradas y salidas de Control. Las señales digitales de control pueden ser las correspondientes a las entradas o a las salidas que recibe o emite el equipo de campo para actuar sobre la aparataje. Estas señales deben guardar una rigurosa fidelidad con los planos desarrollados de los bastidores. La conexión de los cables que portan las señales de entrada y salida a los bornes del equipo debe estar en concordancia con la documentación del listado de señales. A cada señal de entrada o salida se le

debe asignar una identificación, que corresponderá siempre para unos determinados bornes. El número de señales dependerá de la propia posición. Los equipos podrán aumentar su capacidad para poder gestionar una mayor cantidad de señales a través de la conexión de tarjetas de expansión.

- LED de control. Muchos de los relés de control comerciales presentan en su panel LED de control. Estos pueden ser configurados en lógica asociándolos a las señales más importantes que precisan de una notificación inmediata al usuario. Comúnmente estos LED se asocian entre otras señales a:
  - Alarma de defecto y/o defecto urgente (reúnen todas las señales que generan alarma).
  - Estado en Local (UCP) o en Telemando.
  - Notificación de entrada de orden.
  - Existencia de fallo de comunicaciones por fibra óptica.
- Señales de protección. Los relés de control pueden comunicarse con equipos externos que protegen a la posición de sobreintensidades, sobretensiones, subtensiones, corrientes de baja o alta frecuencia..., provocadas por fallos y desequilibrios en la red. Tras la detección de una de estas faltas, estos equipos de protección, si así se establece según los ajustes establecidos de selectividad, disparan el interruptor de la posición evitando que se propague al resto de la subestación. En el equipo de control puede ser implementada otra tarjeta que permita activar diferentes unidades de protección sobre la posición que gobiernan, convirtiéndose así en un equipo de control y protección. Ya sea de la primera o de la segunda forma, el control se comunica con las diferentes unidades de protección, pudiendo incorporar estas señales dentro de su lógica, de modo que puedan activar alarmas, realizar bloqueos y ser enviadas a la UCS. Ambas disciplinas, control y protección, trabajan así de una forma coordinada, principal objetivo del SIPCO. Existen varios tipos de señales de protección (que varían dependiendo de la existencia de una tarjeta interna de protección) que intervienen en las configuraciones lógicas:
  - Señales de entrada. Son entradas de campo a la tarjeta de protección o, directamente, a la tarjeta de control si son protecciones externas.
  - Señales AUX/EP. Son las salidas de la tarjeta de protección que van hacia la tarjeta de control. Para esta última, este tipo de señales son denominadas como Entradas de Protección (EP).
  - Señales de salida para protección. Son las salidas de la tarjeta de control que se cablean como entradas de la tarjeta de protección, o directamente al equipo externo de protección.

- Señales para LED de protección.

Como ejemplo, la Figura 6 representa la arquitectura de las señales en un equipo de control comercial (ZIV Aplicaciones y Tecnología, 2005) que posee una tarjeta interna de protección. Sin entrar en una descripción completa de la figura (que puede encontrarse en la referencia citada), se puede observar cómo la protección envía señales y medidas al control (parte izquierda de la figura), que tras ser tratadas en la lógica generan señales de entrada de nuevo a la tarjeta de protección (parte derecha de la misma).

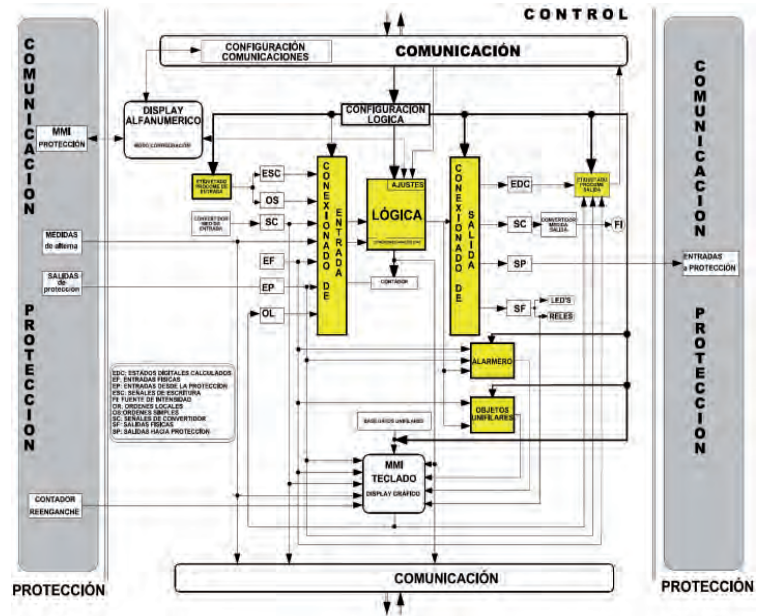


Fig. 6: Arquitectura de señales en un equipo comercial (ZIV Aplicaciones y Tecnología, 2005).

### 4.3. INFORME DE ÓRDENES DE ACUERDO CON EL PROTOCOLO DE COMUNICACIONES

Los equipos UCP reciben órdenes desde la subestación y desde el despacho a través de la fibra óptica conectada generalmente a una tarjeta de control. Estas órdenes actúan sobre los distintos elementos de la posición efectuando las múltiples maniobras habilitadas.

Como ejemplo, con el protocolo PROCOME, las entradas de orden reciben en la configuración una asignación de señal específica. Las órdenes son tratadas en lógica de manera que son filtradas y descartadas si existe algún tipo de bloqueo que impida su ejecución. Si no existe ningún enclavamiento, en el equipo se cierra un contacto (salida digital) que se encuentra cableado directamente al elemento a maniobrar. Las órdenes desde el telemando precisan para su progreso que el sistema se encuentre en estado de telemando activo. Entran dentro de este grupo las órdenes de poner y quitar el interruptor en descargo y abrir el interruptor si la posición está puesta a tierra. Los equipos identifican cada señal según una etiqueta. A cada orden se le asigna el mismo número de etiqueta en la UCS y en el equipo.



#### 4.4. INFORME DE ESTADOS DE ACUERDO CON EL PROTOCOLO DE COMUNICACIONES

De la misma forma que lo explicado en el anterior punto, los estados que son controlados por el equipo son etiquetados según el protocolo. El número de etiqueta asignado a cada estado debe coincidir con la misma asignación en la UCS para ese mismo estado. El objeto de este informe de estados reside en poder transmitir con todo detalle, a la UCS y al Telemando, lo que acontece en la posición controlada por el relé de control. No todas las señales de campo que recibe el equipo son tratadas en lógica. El sentido de cablearlas reside precisamente en poder transmitir a la UCS los estados de esas señales que no tienen capacidad por sí mismas de entrar en comunicación con el control general de la subestación si no es a través de los equipos UCP. Sin embargo, existen otras señales que recibe la UCP, que entran a formar parte de la implementación lógica pero que no se les asigna una etiqueta. Son las señales de salida, tratadas por las fichas lógicas partiendo de las de campo, las que son enviadas por comunicaciones junto con otras entradas de alarma. El informe de señales debe por tanto garantizar la siguiente información:

- Número de etiqueta, según las reglas del protocolo de comunicaciones utilizado.
- Elemento al que pertenece la señal. La definición y número del elemento debe ser acorde a la dada en los planos unifilares simplificado y desarrollados.
- Descripción textual breve de la señal.
- Descripción de la señal según estado activado o desactivado. En ocasiones la descripción bajo texto no permite identificar totalmente a qué señal corresponde. Se hace necesario entonces detallar qué estado indica si la señal se encuentra en 1 cuál si está en 0.
- Descripción del tipo de señal. Puede diferenciarse entre estado, alarma o señal de protección.

Todas las órdenes desde UCP, UCS y telemando y las escrituras deben recibir una etiqueta en el informe. Los estados reflejan también los disparos del interruptor de protecciones y automatismos externos. De esta forma, si se realiza una maniobra de apertura de la posición sin intervención directa del control, quedará reflejada qué protección o protecciones han disparado.

#### 4.5. INFORME DE MEDIDAS DE ACUERDO CON EL PROTOCOLO DE COMUNICACIONES

Los equipos deben tener capacidad para medir corrientes y tensiones a través de bornes específicos de medida, ya que son parámetros necesarios para la protección y señalización de las magnitudes principales de la carga que circula por la posición. Mención especial merece la medida de tensión en barras, pues su medición puede realizarse a través de un convertidor o mediante medida directa. Ello implica que los terminales a los que se conecta la salida del transformador de medida varíen en un caso u otro.

#### 4.6. INFORME DE SEÑALES DE ALARMA

Los equipos suelen poseer capacidad para configurar en sus pantallas múltiples alarmas diferentes. Las alarmas pueden ser configuradas principalmente de dos formas distintas: con y sin reconocimiento.

#### 4.7. INFORME DE ESCRITURAS DE ACUERDO CON EL PROTOCOLO DE COMUNICACIONES

Otro tipo de señales de comunicación son las denominadas Escrituras. Estas transmiten los estados de los elementos de la apartada de la subestación. A cada equipo de posición (UCP) le llegan los estados de los elementos y medidas propios de la posición a través del cableado de entradas digitales. Si una posición precisa del conocimiento de señales propias de otra UCP, la UCS es la encargada de facilitarle esa información, haciendo así de intermediario.

El siguiente ejemplo ilustra la explicación del funcionamiento de las escrituras: la UCP que gobierna la partición de las barras tiene cableada a sus bornes la señal de medida de presencia de tensión en las mismas. El resto de UCP pertenecientes a ese juego de barras también necesita conocer si están o no energizadas, pero no tienen cableada esta medida. La UCP de partición de barras envía a la UCS el estado de la presencia de tensión. La UCS, mediante una escritura, envía este estado al resto de UCP a las que está enlazada.

#### 4.8. UNIFILAR PARTICULAR DE LA UCP

La documentación debe facilitar el esquema unifilar de la posición que tiene que visualizarse en la pantalla de los equipos de control junto con sus mandos. La presencia de los diferentes elementos en el unifilar de la UCP indica que el equipo tiene, en mayor o menor medida, control sobre ellos. La lógica, las distintas señales de campo y las órdenes y estados permitirán conocer este grado de control. La denominación con la que se nombran los elementos en la pantalla debe estar en concordancia con la que se utiliza en los planos de los unifilares generales.

#### 4.9. DIAGRAMAS LÓGICOS

Esta parte de la documentación desarrolla la lógica a implementar a través de diagramas lógicos que permitan llevar a cabo el control deseado de la posición. No es preciso detallar el 100% de la lógica en la ingeniería de control si existe un paquete de lógicas que se implemente en todas las configuraciones, como son: la determinación de estados del interruptor, del seccionador, la creación de pulsos para órdenes... Si se deben detallar aquellas partes que pueden estar sujetas a variaciones como los enclavamientos, alarmas y cálculo de salidas no convencionales.

Para mayor simplicidad, se recomienda que los diagramas lógicos se representen de manera sencilla para la mayor comprensión del configurador, utilizando, por ejemplo, símbolos lógicos. La elaboración de una leyenda explicativa de los símbolos lógicos a emplear facilita esta tarea.

La lógica debe estar definida en bloques. Cada bloque lleva asociada una ficha que detalla una acción concreta según un elemento de la aparatada (bloqueo del cierre del interruptor, estados del seccionador, orden de puesta en servicio del reenganchador...). Cada ficha estará compuesta por el número de funciones precisas para la correcta ejecución de la lógica a implementar.

## 5. EL FUTURO EN LA AUTOMATIZACIÓN DE SUBESTACIONES

De acuerdo con (Meliopoulos, 2007), el futuro en la automatización de las subestaciones eléctricas está en que todos los datos sobre la mismas estén disponibles en tiempo real para el resto de elementos del sistema de energía eléctrica del que forman parte, de forma precisa, confiable y segura. Además, la comunicación debe ser bidireccional, para permitir la operación a distancia, y debe poder establecerse entre equipos de diferentes fabricantes. De la necesidad de normalización internacional en esta área, surge la serie de normas IEC 61850 (IEC, 2010). La norma está basada en una arquitectura de comunicaciones en red que, además de las ventajas anteriores, permite la eliminación de gran parte del cableado de cobre, que va desde los equipos eléctricos primarios a los de control (Dolezilek, 2005). Las ventajas de este tipo de redes de comunicación están impulsando su adopción en los nuevos desarrollos de automatización de subestaciones eléctricas (Ingram y Ehlers, 2007) y motivando recientes investigaciones en este campo, p.e. (Mercurio, et al., 2009), (Shen, et al., 2009), (Premaratne, et al., 2010) y (Thomas y Ali, 2010).

El informe (Kezunovic, et al., 2010) ofrece un completo análisis sobre el proyecto de las subestaciones eléctricas del futuro, distinguiendo entre tres escenarios diferentes: la reconversión de subestaciones existentes, para mejorar sus prestaciones y reducir costes; el proyecto de subestaciones nuevas, utilizando los equipos disponibles actualmente, pero con una nueva arquitectura basada en las nuevas posibilidades de comunicación; y el diseño de "subestaciones inteligentes" basadas en nuevas tecnologías de equipos y comunicaciones.

## 6. CONCLUSIONES

Se ha presentado una introducción a la ingeniería de control y protección de subestaciones eléctricas, junto con las principales conclusiones de un trabajo de revisión sobre diferentes proyectos en este campo: se han identificado los aspectos claves a tener en cuenta en la realización de un buen proyecto, adecuado a las complejas necesidades actuales de estas instalaciones, y se ha especificado la documentación a incluir.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Parte de este trabajo ha contado con financiación del Ministerio de Educación, mediante el Programa Nacional de Movilidad de Recursos Humanos del Plan Nacional de I-D+i 2008-2011, referencia PR2010-0021.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Amantegui J, Ojanguren I, de Carlos C, et al. "Automation of HV Substations in Iberdrola. Experiences and Plans". En *58th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. College Station, Texas, USA: IEEE, 5-7 Abril 2005, p. 194-200, ISBN: 0-7803-8896-8
- Chowdhury SP, Chowdhury S, Crossley P, et al. "UK scenario of islanded operation of active distribution networks with renewable distributed generators". *Renewable Energy*. Diciembre 2009. Vol. 34-12 p. 2585-2591
- Dolezilek D. *IEC 61850: What you need to know about functionality and practical implementation* [en línea]. Pullman, WA, USA: Schweitzer Engineering Laboratories, 2005. 17 p. Disponible en Internet: <<http://www.selinc.com/literature/literature.aspx?fid=282>> [consulta: 14 octubre 2010]
- IBERDROLA. *Normativa particular para instalaciones de clientes en AT*. MT 2.00.03. IBERDROLA, 2003
- IEC. *Communication networks and systems in substations - ALL PARTS*. IEC 61850-SER. Edición 1.0. Genève, Suisse: IEC, 2010
- Ingram M, Ehlers R. "Toward Effective Substation Automation". *IEEE Power and Energy Magazine*. Mayo-Junio 2007. Vol. 5-3 p. 67-73
- Kezunovic M, Ghavami M, Guo C, et al. *The 21st Century Substation Design. Final Project Report* [en línea]. PSERC Publication 10-15, Septiembre 2010. Disponible en Internet: <[http://www.pserc.wisc.edu/documents/publications/reports/2010\\_reports/](http://www.pserc.wisc.edu/documents/publications/reports/2010_reports/)> [consulta: 11 octubre 2010]
- Meliopoulos APS. "Substation automation: Are we there yet?". *IEEE Power and Energy Magazine*. Mayo-Junio 2007. Vol. 5-3 p. 28-30
- Mercurio A, Di Giorgio A, Cioci P. "Open-Source Implementation of Monitoring and Controlling Services for EMS/SCADA Systems by Means of Web Services-IEC 61850 and IEC 61970 Standards". *IEEE Transactions on Power Delivery*. Julio 2009. Vol. 24-3, p. 1148-1153
- Mujal-Rosas RM. *Tecnología Eléctrica*. 2ª edición. Barcelona: Edicions UPC, 2003. 455 p. ISBN: 84-8301-716-4
- Niknam T, Meymand HZ, Nayeripour M. "A practical algorithm for optimal operation management of distribution network including fuel cell power plants". *Renewable Energy*. Agosto 2010. Vol. 35-8 p. 1696-1714
- Ostojic G, Stankovski S, Tarjan L, Senk I. "Development and Implementation of Didactic Sets in Mechatronics and Industrial Engineering Courses". *International Journal of Engineering Education*. 2010. Vol. 26-1 p. 2-8
- Premaratne U, Samarabandu J et al. "Security Analysis and Auditing of IEC61850-Based Automated Substations". *IEEE Transactions on Power Delivery*. Octubre 2010. Vol. 25-4, p. 2346-2355
- Sánchez-Ruiz J. "Nuevos conceptos para la automatización de centros de transformación". *DYNA Ingeniería e Industria*. Noviembre 2009. Vol. 84-8 p. 665-670
- Shen M, Chan F, Laprise R et al. "A fully integrated substation LAN network for protection, control and data acquisition". En *2009 Power & Energy Society General Meeting*. Calgary, Canada: IEEE, 26-30 julio 2009, p. 1-6, ISBN: 978-1-4244-4241-6
- Thomas MS, Ali I. "Reliable, Fast, and Deterministic Substation Communication Network Architecture and its Performance Simulation". *IEEE Transactions on Power Delivery*. Octubre 2010. Vol. 25-4, p. 2364-2370
- ZIV Aplicaciones y Tecnología. *7IVD Z. Terminal de Protección, Control y Medida para Distribución* [en línea]. Zamudio, Vizcaya: ZIV Aplicaciones y Tecnología, 2005. 254 p. Disponible en Internet: <<http://www.zivpmasc.es/documentacion/manuales.html>> [consulta: 12 octubre 2010]

# Sistema integral para inspección automática por ultrasonidos de ruedas elásticas ferroviarias



Francisco Javier González-Fernández\* Doctor Ingeniero Industrial  
 María Antonia García-San Andrés\*\* Ingeniera Industrial  
 Carlos Sancho-de Mingo\*\* Doctor Ingeniero industrial  
 Antonio González-Rodríguez\*\* Ingeniero Industrial  
 Miguel Gómez-Parra\*\* Ingeniero Industrial

\* 2 iT - Ingeniería de Instalaciones y Trenes, S.L. Avda Nazaret, 3 - 28009 Madrid.  
 Tfno: +34 914 094594. javier.gonzalez@2itingenieria.com

\*\* Metro de Madrid. C/ Néctar, s/n - 28022 Canillejas (Madrid). Tfno: +34 917 415942.  
 mantonia.garcia@metromadrid.es; carlos.sancho@metromadrid.es;  
 antonio\_gonzalez@mail.metromadrid.es; miguel.gomez@mail.metromadrid.es

Recibido: 02/11/2010 • Aceptado: 21/03/2011

## Automatic inspection system for railway wheels

### ABSTRACT

• Currently, the railroad complies with stringent security requirements. A key element from the point of view of security is the condition of the wheels of railway vehicles. From the standpoint of maintenance, ensuring the optimum state of wheels is always a priority, so the development of advanced inspection methods of the wheels (both external geometry and internal defects) is nowadays more relevant in the sector. This paper presents an innovative ultrasonic inspection system in railway resilient wheels, incorporating full automation of the measurement process, diagnosis and management of information, all without having to remove any wheel.

• **Keywords:** railways, wheels, maintenance, automatic inspection, ultrasounds, shrinkage cracks, Non Destructive Testing (NDT).

### RESUMEN

En la actualidad, el ferrocarril debe cumplir con exigentes requisitos de seguridad. Un elemento fundamental, desde el punto de vista de la seguridad, es el estado de las ruedas de los vehículos ferroviarios. Desde el punto de vista del mantenimiento, garantizar el estado óptimo de la rodadura está siempre a la cabeza de las prioridades, por lo que el desarrollo de métodos de inspección avanzados de las ruedas (tanto de su geometría externa como de defectos internos) cobra día a día mayor relevancia en el sector. El coste de estas inspecciones de forma manual es muy elevado. Este artículo presenta un innovador sistema de inspección por ultrasonidos en ruedas ferroviarias elásticas, integrando una automatización completa del proceso de medida, diagnóstico y gestión de la información, y todo ello sin necesidad de desmontar una sola rueda, y con mínimas intervenciones manuales; lo que implica un reducido coste de explotación.

**Palabras Clave:** ferrocarril, ruedas, mantenimiento, inspección automática, ultrasonidos, fisuras, Ensayos No Destructivos (END).

### 1. ANTECEDENTES

En las explotaciones ferroviarias, el método de desplazamiento suburbano más ampliamente utilizado es el de rueda de acero rodando sobre un carril igualmente de acero. Las ruedas de los trenes tienen por misión sustentar, guiar, transmitir al carril los esfuerzos, lograr circular en curvas y frenar. Cada una de estas funciones induce solicitaciones térmicas y mecánicas en las ruedas.

Los elevados requerimientos de seguridad que se aplican en el sector ferroviario exigen una revisión periódica del material rodante y muy especialmente de las ruedas de los trenes, por la posible aparición de fisuras que en caso de progresar conducen a la fractura de la rueda con consecuencias potencialmente catastróficas. El coste de estas intervenciones suele ser uno de los más relevantes en cualquier explotación, por lo que su optimización es un reto para todas ellas.

En la actualidad todas las explotaciones ferroviarias inspeccionan regularmente sus ejes y ruedas mediante ensayos no destructivos, siendo la técnica predominante la de ultrasonidos. La inspección puede realizarse de forma manual o mediante sistemas



automatizados. El principal problema de la inspección manual de ruedas es disponer de personal muy especializado en la técnica de análisis de fisuras por ultrasonidos y la gran cantidad de tiempo que se emplea en la misma y que afecta a la disponibilidad del material móvil.

En tranvías, metros ligeros y ferrocarriles suburbanos, se suelen utilizar ruedas elásticas (Figura 1), que consisten en unir el bandaje metálico (llanta) al bloque también metálico de la rueda a través de una banda elástica o tacos de goma que permiten dos grandes ventajas:

- amortiguar ruidos y vibraciones derivadas de la rodadura, mejorando el confort de los viajeros;
- permitir la posibilidad de cambiar la llanta conservando el bloque de la rueda, lo que abarata el mantenimiento del material rodante.

La aparición de fisuras en las ruedas elásticas es un fenómeno de vital importancia para la correcta circulación de los trenes debido a dos factores principalmente:

- Seguridad: debido al peligro de rotura de la rueda o de que parte de la pestaña o de la banda de rodadura se desprenda, pudiendo ocasionar un descarrilo.
- Confort: las grietas pueden llegar a ocasionar coqueas que producen altas vibraciones y empeoran el confort de los viajeros.

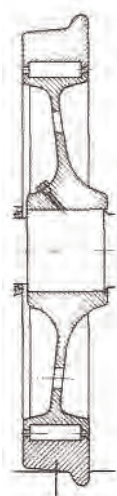


Fig. 1: Rueda elástica

## 2. TIPOLOGÍA DE FISURAS ESPERABLES EN EL BANDAJE DE RUEDAS ELÁSTICAS

A efectos del estudio de las posibles fisuras en el bandaje, se consideran tres zonas de análisis, tal como se muestra en la Figura 2.

### 2.1. ZONA INTERNA DEL BANDAJE

Se caracteriza por ser la zona donde es más probable la aparición de fisuras, interesando la detección de fisuras lo más pequeñas posibles, incluso incipientes.

Dentro de esta zona, destaca específicamente la cobertura de la parte alrededor del vértice central, que es donde es de esperar la mayor probabilidad de aparición de fisuras, al ser

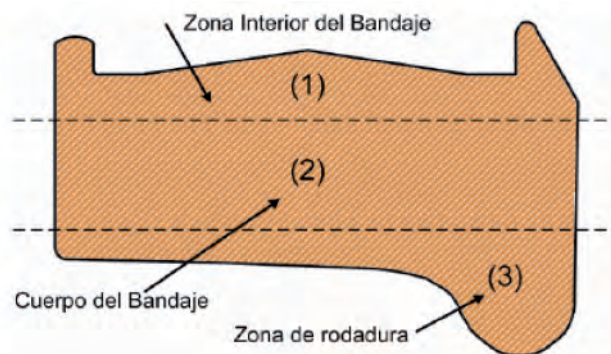


Fig. 2: Zonas del Bandaje

el área donde se produce el contacto eléctrico de tierra, a través de tres tacos con *shunt* de cobre dispuestos a 120° que son los que permiten el paso de la corriente de tracción y servicios auxiliares.

### 2.2. CUERPO DEL BANDAJE

En esta zona la probabilidad de aparición de fisuras es escasa. Concretamente, podrían encontrarse poros, pliegues de laminación o zonas con aglomeración de óxidos e inclusiones no metálicas, estando estos defectos más relacionados con el proceso de fabricación que con el desgaste propio de la rueda.

Aunque la aparición de este tipo de defectos es poco frecuente, estos defectos pueden dar lugar a grietas de fatiga que van progresando en el tiempo y terminar en la rotura del bandaje.

Para esta zona, se deberá disponer un conjunto de palpadores que realicen la inspección del interior del bandaje desde la banda de rodadura para detectar los defectos que se encuentren en la zona central.

### 2.3. BANDA DE RODADURA

En esta zona es esperable la aparición de fisuras superficiales (*spalling*), causadas por la formación de planos de bloqueo en la zona de rodadura, donde la fricción entre el carril y la rueda introduce una alta carga térmica local en la banda de rodadura, alcanzándose temperaturas próximas a 800°C. A estas temperaturas el límite elástico disminuye, pudiéndose producir deformación plástica.

Cuando se libera la rueda se produce un rápido enfriamiento y se puede producir un cambio de fase en la banda pasando de estructura *perlítica* a *martensita* mucho más frágil, lo que - unido a una contracción por el enfriamiento - produce una microfisura que tiende a progresar por la acción de las tensiones del contacto de la rodadura.

Por este motivo, deben eliminarse por retorneo lo antes posible todos aquellos planos que se formen en las ruedas elásticas. En la normativa de cada explotación se suele establecer el plazo máximo para el retorneo de planos.

Para esta zona, la inspección de fisuras debe orientarse a detectar fisuras no en su fase incipiente, sino cuando ya

han alcanzado una cierta profundidad. De otro modo, los arañazos normales en esta zona de la rueda podrían dar lugar a un elevado número de falsas alarmas.

### 3. TÉCNICAS DE INSPECCIÓN

La técnica de inspección por ultrasonidos es la más ampliamente utilizada actualmente en la detección de fisuras en aceros, y de los diferentes métodos aplicables mediante esta técnica, el más indicado para la inspección de ruedas ferroviarias es el llamado “pulso-eco”.

Otros métodos como “transmisión”, que se emplea en materiales de gran atenuación como los *composites* aeronáuticos o “*time-of-flight diffraction*” (Difracción del tiempo de vuelo) ampliamente usados para inspección de soldaduras no son apropiados para esta aplicación.

De forma muy breve, un sistema de inspección por ultrasonidos utiliza las propiedades de transmisión del sonido en los materiales para identificar la presencia, posición y tamaño de discontinuidades en el mismo.

Para obtener resultados aprovechables, se utilizan frecuencias mucho más allá de las frecuencias audibles, en el rango de los megahercios, de ahí el nombre de ultrasonidos. Para generar los ultrasonidos se utilizan unos transductores denominados palpadores, basados en el efecto piezoeléctrico y que convierte la energía eléctrica en acústica y viceversa. Se aplican impulsos eléctricos de muy corta duración para generar frentes de onda muy cortos y poder disponer así de una gran resolución en distancia. La Figura 3 muestra la composición de un palpador clásico.

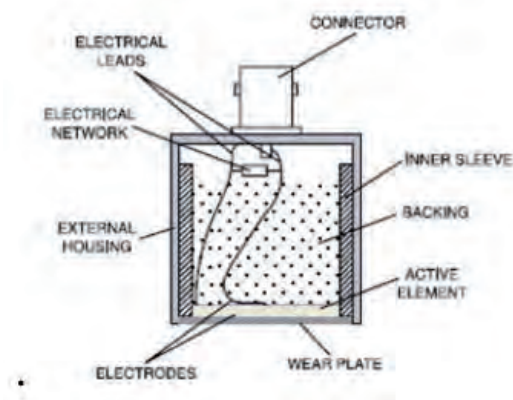


Fig. 3: Palpador de Ultrasonidos

Estos palpadores ultrasónicos generan un haz sonoro que se propaga en línea recta perpendicular a la cara frontal del mismo. Como cualquier onda, a la salida del elemento emisor se encuentra un campo cercano donde la amplitud del campo sonoro presenta grandes variaciones. La longitud de este campo cercano depende del diámetro del elemento radiante y de la frecuencia. En concreto:

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{D^2 \times f}{4c}$$

Más allá del campo cercano, en el llamado campo lejano, la onda sonora se va atenuando de forma gradual a la vez que el haz se va abriendo con un ángulo que de nuevo depende del diámetro del emisor y de la frecuencia:

$$\alpha_{-6dB} : \sin(\alpha / 2) = 0,514 \times \frac{\lambda}{D} = 0,514 \times \frac{c}{f \times D}$$

En ambas formulas, c representa la velocidad del sonido en el material por donde viaja la onda acústica, su valor depende del *modulo de Young* del material y de su densidad. La Figura 4 muestra una representación de los parámetros anteriormente descritos para un palpador típico.

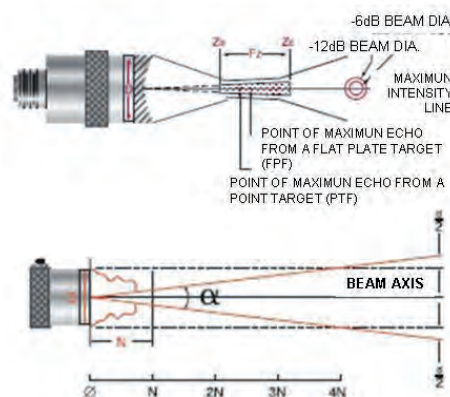


Fig. 4: Parámetros físicos del sonido

Las ondas generadas pueden avanzar según ciertos modos de propagación. Los más habituales en la inspección industrial por ultrasonidos son:

- **Ondas longitudinales:** la dirección de propagación de la onda y la de la vibración coinciden.
- **Ondas transversales:** la dirección de propagación de la onda y de la vibración son perpendiculares.
- **Ondas superficiales:** también llamadas de *Rayleigh*, que se propagan por la superficie de los materiales, siguiendo su contorno.

La Figura 5 ilustra los modos de propagación longitudinal y transversal.

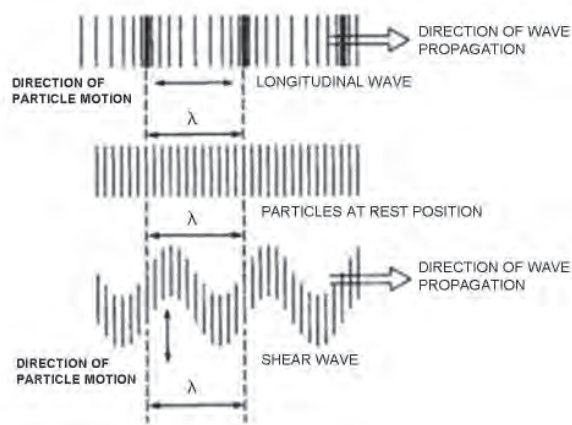


Fig.5: Palpador de Ultrasonidos

La velocidad del sonido en el medio depende del modo de propagación del sonido. En el acero la velocidad de las ondas longitudinales es de aproximadamente 5.940 m/seg, mientras que para las ondas transversales esta velocidad se reduce a 3.260 m/seg. En el agua la velocidad del sonido, ondas longitudinales, es de 2.730 m/seg, en los líquidos y gases no se propagan las ondas transversales.

Dos importantes propiedades de las ondas, en general, y del sonido, en particular, son la Reflexión y la Refracción.

Cuando una onda viaja por un medio y pasa a otro medio diferente, con velocidades de propagación diferentes en uno y otro, una parte de la energía “incidente” pasa al otro material, onda “transmitida”, pero otra parte se “refleja” y retorna hacia el medio incidente dando lugar a una onda “reflejada”.

La cantidad de energía que se transmite y se refleja depende la relación de velocidades en cada medio, es lo que se denomina coeficiente de reflexión. La figura 6 ilustra estos conceptos:

Si la onda incide perpendicularmente a la superficie del otro material la onda transmitida y reflejada mantienen la dirección, pero si incide oblicuamente se produce el fenómeno de la refracción. Ver Figura 7.

Las velocidades del sonido en ambos medios vienen dadas por  $c_1$  y  $c_2$ . Hay un par de velocidades para cada medio según hablemos de ondas longitudinales o transversales.

Para un determinado ángulo de incidencia, la onda transmitida se refracta  $90^\circ$  dando lugar a una onda de superficie. Por encima de este ángulo crítico, se produce la reflexión total.

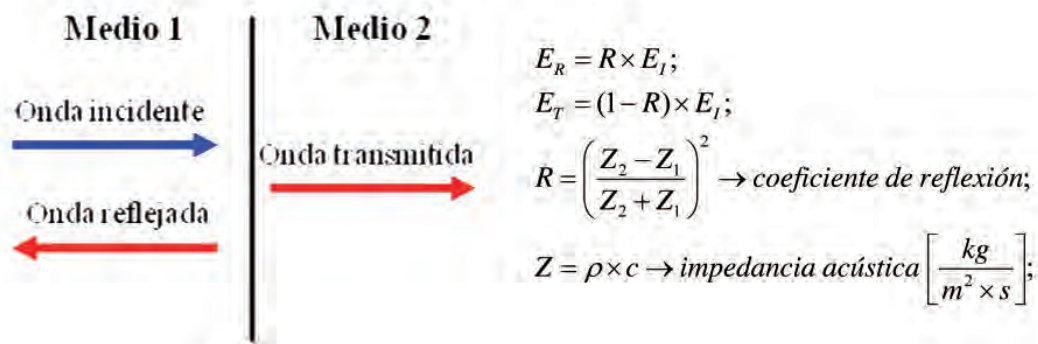


Fig. 6: Reflexión de onda con incidencia normal

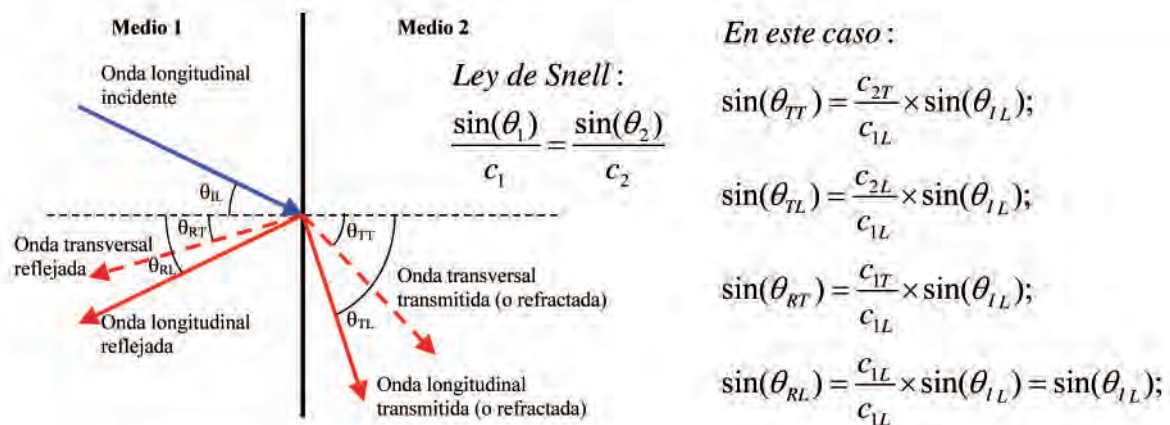


Fig.7: Reflexión y refracción de onda con incidencia oblicua



Para detectar un defecto se utiliza el hecho de que una fisura (o el final del material) presenta un cambio de impedancia radical, con un cambio de velocidades que hace que la práctica totalidad de la onda se refleje. Un palpador emite un pulso de ultrasonidos que en el caso de ausencia de defectos alcanzara el otro extremo del material reflejándose de forma total.

Una fisura producirá un eco, de amplitud proporcional a su área y que alcanzará el palpador en un tiempo, llamado “tiempo de vuelo” proporcional a su distancia a la superficie. Ver Figura 8.

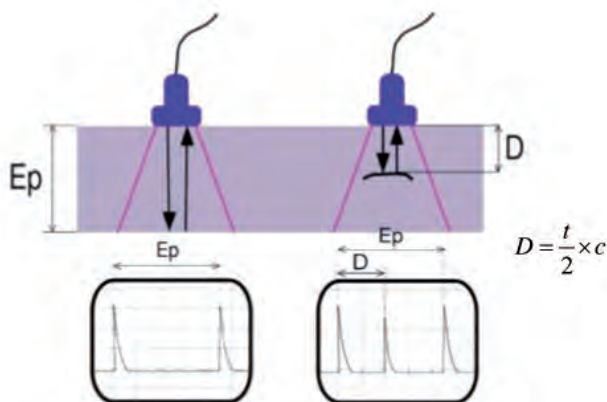


Fig. 8: Ecos de un defecto y el fondo

La distancia se determina con gran precisión simplemente midiendo el tiempo de vuelo. La dimensión de una posible fisura se estima comparando la amplitud de la señal del sonido reflejado con la amplitud del sonido reflejado por un reflector de referencia de tamaño conocido o con el eco de fondo en las zonas que no contienen grietas.

Cuando se inspecciona volúmenes la representación más habitual es el C-Scan, que representa la amplitud de los ecos recibidos en función de la posición del palpador en un barrido bidimensional. La amplitud se representa en falso color (escala de grises o colores). La Figura 9 muestra una representación C-Scan.

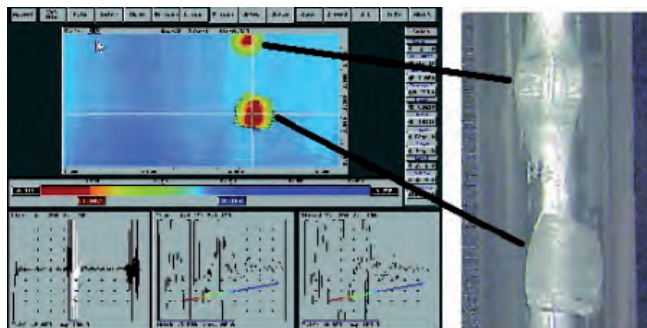


Fig. 9: Representación C-Scan

En el eje de abscisas se tiene la posición horizontal del palpador (barrido), mientras que en el eje de ordenadas

tenemos la posición vertical del palpador (pasadas), la información de amplitud se tiene en el color de la representación. No hay información de profundidad.

#### 4. PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN MANUAL DE RUEDAS CON BANDAJE

Actualmente, en METRO de Madrid, la inspección de las ruedas se realiza mediante ultrasonidos, utilizando la técnica de impulso-eco, que presenta las ventajas de permitir estimar la posición y el tamaño de las fisuras detectadas.

La localización de la fisura está determinada por el “tiempo de vuelo” entre el pulso inicial y el eco producido por la falla. Para una velocidad del sonido ese tiempo se traduce en una distancia.

Las dimensiones de las fisuras se estiman comparando la amplitud de la señal del sonido reflejado por una falla con la amplitud del sonido reflejado desde un reflector de referencia de tamaño conocido.

La inspección se realiza de forma manual, utilizando palpadores posicionados en la banda de rodadura, utilizando grasa como acoplante y con el ángulo de inclinación apropiado (se utilizan palpadores con ángulos de incidencia de 0° y 45°) para examinar la llanta (bandaje metálico de la rueda).

Para el ajuste del equipo se utiliza un bloque patrón de calibración tipo K1-V1 y, como ayuda a la interpretación de resultados, se utiliza otro bloque de un acero con características similares al de la pieza a examinar, con taladros de fondo plano a distintas profundidades.

#### 5. LIMITACIONES OPERATIVAS DE LA INSPECCIÓN MANUAL

Con el método de inspección manual descrito en el punto 3, el tiempo de indisponibilidad por unidad de 2 coches (16 ruedas) se estima en unas 7 horas, incluyendo, además del proceso de inspección propiamente dicho, el tiempo necesario para el correcto posicionamiento de los ejes y la disposición del equipo de inspección. En términos operativos, se requiere una jornada de trabajo y dos agentes especializados para realizar la inspección de una unidad de dos coches.

A la vista de esto, en las explotaciones ferroviarias medianas o grandes, la gran cantidad de ejes a inspeccionar justifica sobradamente la inversión en un equipo de inspección automatizado que permita realizar las mediciones necesarias para garantizar el buen estado del material rodante sin penalizar su disponibilidad.

Vista la necesidad de mejorar el actual método de inspección manual y la inadecuación de los equipos de inspección automática disponibles a sus necesidades específicas, METRO de Madrid ha decidido abordar un proyecto de I+D+i para diseñar y desarrollar un sistema

de inspección automática específicamente adaptado a sus necesidades, con los siguientes objetivos específicos:

- conseguir la inspección periódica de la totalidad del material móvil con ruedas elásticas de la red;
- aumentar la seguridad del material móvil mediante un sistema de inspección de mayor fiabilidad;
- optimizar las necesidades de personal cualificado en la realización de la inspección, eliminando la necesidad de un conductor para posicionar los ejes a inspeccionar y sacar el máximo partido a los técnicos con alto nivel de cualificación que realizan inspecciones por ultrasonidos;
- minimizar el tiempo de indisponibilidad de las unidades inspeccionadas;
- efectuar el diagnóstico del estado del bandaje de las ruedas en tiempo real;
- incorporar los resultados de cada inspección en una base de datos que pueda ser consultada a distancia a través de la red informática de la explotación;
- diseñar una estrategia de inspección específica orientada hacia la inspección completa de todas las zonas críticas del bandaje de las ruedas, diferenciando zonas según el tipo y el origen de los defectos encontrados.

## 6. REQUISITOS PARA UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE INSPECCIÓN

El sistema que aquí se describe está concebido para automatizar la totalidad del proceso de inspección de ruedas elásticas de los trenes de la red en servicio, permitiendo sistematizar el complejo proceso de inspección para la detección de fisuras en el bandaje metálico de las ruedas. Para conseguir esto, el sistema debe hacer frente a una serie de requisitos técnicos.

### 6.1. AUTOMATIZACIÓN COMPLETA DEL PROCESO DE INSPECCIÓN Y REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE INDISPONIBILIDAD

Se pretende que, al situar el tren a inspeccionar en un punto determinado, el sistema sea capaz de operar de forma totalmente desatendida mediante la simple activación de un pulsador.

Esta mejora del proceso de medida puede lograrse con un sistema de medición automatizado, que pueda operar de forma totalmente desatendida o, como mínimo, con un grado de intervención muy limitado.

Una de las principales dificultades para lograr estas condiciones operativas es conseguir automatizar el proceso de colocación de los sensores de ultrasonidos sobre la superficie de la rueda a inspeccionar.

*Con el tren movido por medios externos, se sitúa sobre un lugar fijo predefinido donde se ubican los sensores de medida. Esta solución requiere de un sistema de carros de*

*arrastre, complementado con un sistema de elevación que permita despegar la rueda del carril unos milímetros y girar la rueda mediante un accionamiento externo.*

Para el desarrollo del presente proyecto se ha optado por esta solución, ya que permite operar de forma desatendida pues, una vez posicionado el tren en una zona, son los carros de arrastre y su control electrónico el que realiza toda la secuencia de operaciones necesaria.

### 6.2. DIAGNÓSTICO AUTOMÁTICO

La posibilidad de realizar una diagnosis automática elimina la posibilidad del fallo humano, como puede ser la incorrecta disposición del equipo de ultrasonidos o la posibilidad de que pueda quedarse alguna zona de la rueda sin inspeccionar convenientemente.

Además, la utilización de un equipo automático multicanal permite incrementar el número de palpadores utilizados en la inspección sin penalización en el tiempo empleado para la misma, lo que redundará en una cobertura más completa de todas las zonas a inspeccionar, pudiendo implementarse estrategias específicas para la inspección completa de cada una de las tres zonas del bandaje.

La diagnosis automatizada tiene grandes ventajas asociadas, como son la repetitividad en la medida, la eliminación de la subjetividad de la diagnosis del especialista y la posibilidad de almacenar de manera cifrada (mediante firma digital) los resultados de diagnosis, garantizando la veracidad y autenticidad de los resultados de cada inspección.

### 6.3. REORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN PARA SU EXPLOTACIÓN REMOTA

Con la información obtenida en tiempo real, el sistema debe generar por sí mismo una base de datos disponible, a través de la red informática de la explotación, para el personal técnico, que no tendrá que desplazarse hasta el equipo para poder ver los resultados del ensayo. Esta posibilidad de acceso remoto a los resultados elimina la necesidad de que haya técnicos cualificados presentes en el momento y lugar en que se realiza el ensayo.

Si bien la calidad de la inspección es clave para garantizar el buen estado del bandaje de la rueda, no es menos importante garantizar una trazabilidad de las inspecciones. La identificación unívoca de qué rueda está siendo inspeccionada se convierte en un aspecto crucial para el adecuado mantenimiento de la rodadura.

Las exigencias de automatización y mínimo grado de servidumbre obligan a la instalación de un sistema de reconocimiento de caracteres por visión artificial (OCR), que en combinación con una estructura adecuada de base de datos permita identificar unívocamente qué rueda está siendo inspeccionada.

A medida que el tren vaya atravesando la zona de captura, el equipo irá recopilando la información relativa a la composición de la unidad y almacenando los resultados de inspección de cada rueda en la base de datos.

#### 6.4. GESTIÓN INTELIGENTE DE LA INFORMACIÓN

Para poder utilizar la información obtenida en tiempo real por el proceso de diagnóstico automatizado y almacenada en una base de datos accesible remotamente maximizando la disponibilidad de la flota y superando los problemas enunciados en el punto 4, el sistema desarrollado debe tener la capacidad de informar cuándo se produzcan incidencias que requieran la intervención de un técnico responsable.

Este aviso se realizará mediante e-mail o SMS, enviados directamente a los teléfonos móviles de los responsables. Las listas de distribución de estos mensajes deben ser configurables en función de la severidad del defecto encontrado, de los turnos de trabajo y de la hora del día en el que ocurra.

Una vez recibido el mensaje de alerta, el técnico responsable puede conectarse mediante una aplicación VPN al servidor donde se almacena la base de datos con los resultados de la inspección desde cualquier parte, pudiendo hacer un diagnóstico exhaustivo, pues en caso de detectarse una alerta el sistema guardará en un archivo la inspección completa registrada.

El responsable puede así tomar la decisión de qué intervención realizar sobre el tren con el máximo de datos disponibles, pues tendrá acceso total a las bases de datos de los históricos de las inspecciones realizadas sobre esa misma rueda o sobre otras. Estas bases de datos están perfectamente integradas con el GMAO utilizado.

Dado que el estado de la rodadura es un aspecto de vital importancia de cara a la seguridad del transporte ferroviario, el sistema cuenta con un mecanismo especial de codificación de archivos (Firma Digital), que permite garantizar la autenticidad de los datos obtenidos por el sistema de inspección. También aporta una garantía absolutamente fiable sobre la integridad de los informes generados automáticamente asegurando que no han sido modificados a posteriori.

Todas estas especificaciones del sistema de gestión de información facilitan enormemente la obtención de efectos de sinergia entre las ventajas de la automatización de procesos y la gran experiencia acumulada por los expertos, sin perder nunca de vista la seguridad que aporta la autenticidad e inviolabilidad de los informes generados.

#### 6.5. CERTIFICACIÓN Y CALIBRACIÓN

Una vez instalado, el sistema deberá ser certificado en el cumplimiento de la normativa sobre la inspección de ruedas elásticas por ultrasonidos aplicada por METRO de Madrid y demostrar que iguala e incluso supera la fiabilidad de la inspección en relación al método manual establecido de acuerdo a dicha normativa. La normativa internacional de referencia que se sigue (ver [1] y [2]) es para ruedas nuevas y es sobre la que se basa la normativa interna de la organización.

Concretamente, la Norma UIC 810-1 establece, para el ensayo por ultrasonidos, que los ecos obtenidos en un

bandaje nuevo deben ser inferiores a los de una pieza patrón que dispone de varios taladros de fondo plano de diámetro 3 mm, distribuidos según se muestra en la Figura 10, de acuerdo a la clase B en que se encuentra ubicado el material rodante.

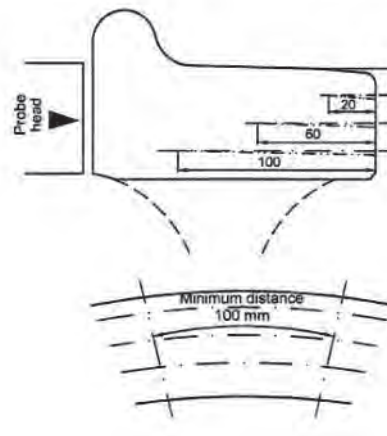


Fig. 10: Sección de la rueda patrón según UIC 810-1

Como se aprecia en la Figura 10, los reflectores de fondo plano preconizados por la normativa para la calibración de los equipos de inspección sólo se ubican en el cuerpo del bandaje, esto es, en la zona en la que es más probable la aparición de defectos de fabricación. Esto es coherente con el hecho de que la normativa esté orientada a la inspección de ruedas nuevas, en las que sólo cabe esperar la presencia de este tipo de defectos.

Sin embargo, el equipo que aquí se describe está concebido para la inspección del bandaje a lo largo de su vida útil, por lo que, en su inspección, no sólo cubre el cuerpo del bandaje, sino también la zona interna del mismo y la banda de rodadura, zonas en las que es más probable la aparición de fisuras por fatiga durante la vida útil de la rueda y, por tanto, de mayor interés desde el punto de vista del mantenimiento.

Por este motivo, la rueda patrón diseñada para la calibración y certificación del equipo de inspección desarrollado, además de los taladros de fondo plano que establece la norma, dispone de entallas de superficie equivalente a la de estos reflectores, distribuidas por la superficie interna del bandaje y en la banda de rodadura.

De este modo, el patrón permite calibrar el equipo para la detección de posibles fisuras que se puedan formar en la banda de rodadura (*spalling* debido a bloqueos de rueda) o en la parte interna del bandaje (por fenómenos de electroerosión en las zonas donde se realiza el contacto eléctrico de tierra).

## 7. ESTRATEGIA DE INSPECCIÓN

De acuerdo con el planteamiento del apartado 2, se han definido unas estrategias específicas para cada una de las tres zonas del bandaje que se describen a continuación.



**7.1. INSPECCIÓN DE LA ZONA INTERNA DEL BANDAJE**

Con el fin de maximizar la sensibilidad a pequeñas fisuras que arranquen desde la superficie interior del bandaje, se empleará un conjunto de seis palpadores distribuidos a ambos lados de la rueda y con ángulos de incidencia adaptados al perfil específico del bandaje en esa zona, tal como se muestra en la Figura 11.

En esta figura se muestran, en línea continua, el perfil de rueda nueva (diámetro 860mm) y en línea discontinua, el perfil correspondiente a rueda al límite de desgaste (diámetro 780mm).

El diseño del sistema de inspección deberá considerar este rango de diámetros para posicionar los palpadores adecuadamente al diámetro de la rueda a inspeccionar.

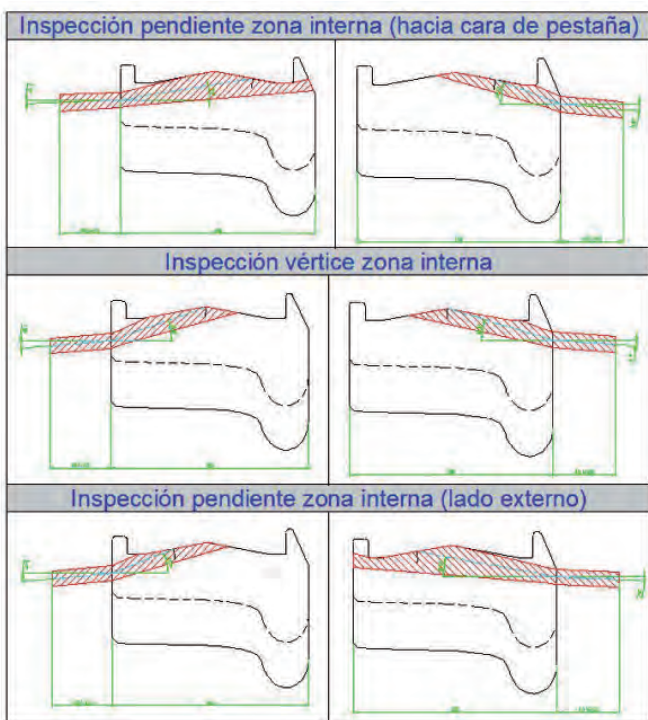


Fig. 11: Inspección Zona Interna

**7.2. INSPECCIÓN DEL CUERPO DEL BANDAJE**

Aunque la aparición de este tipo de defectos es poco frecuente, se ha previsto un conjunto de nueve palpadores, tal como se muestra en la Figura 12, para la inspección del cuerpo del bandaje, con un grado de solape del 10 %, de forma que se garantice la cobertura completa de esta zona.

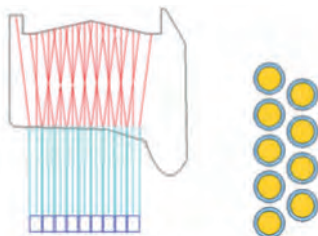


Fig. 12: Inspección Cuerpo

**7.3. INSPECCIÓN DE LA BANDA DE RODADURA**

Para esta zona, la inspección de fisuras debe orientarse a detectar fisuras no en su fase incipiente, sino cuando ya han alcanzado una cierta profundidad. De otro modo, los arañazos normales en esta zona de la rueda, derivados del contacto entre la zona de rodadura y el rail podrían dar lugar a un elevado número de falsas alarmas.

Por ello, se utilizan dos palpadores para cubrir esta zona, tal como se muestra en la Figura 13. Uno, mirando desde la zona de pestaña con incidencia normal, cubre la zona de rodadura y el otro, mirando desde el lado opuesto y con incidencia angular, cubre la transición de la zona de rodadura a la de pestaña.



Fig. 13: Inspección Zona Rodadura

**8. DISEÑO DEL SISTEMA DE INSPECCIÓN**

Para que el sistema de Inspección Integral que aquí se describe pueda cumplir satisfactoriamente con todos los objetivos descritos en los puntos precedentes, implementando la estrategia de inspección descrita en el punto anterior de forma totalmente automática, es necesario integrar el funcionamiento de varios subsistemas distintos, que se describen someramente a continuación. La Figura 14 muestra un diagrama de bloques funcionales del sistema.

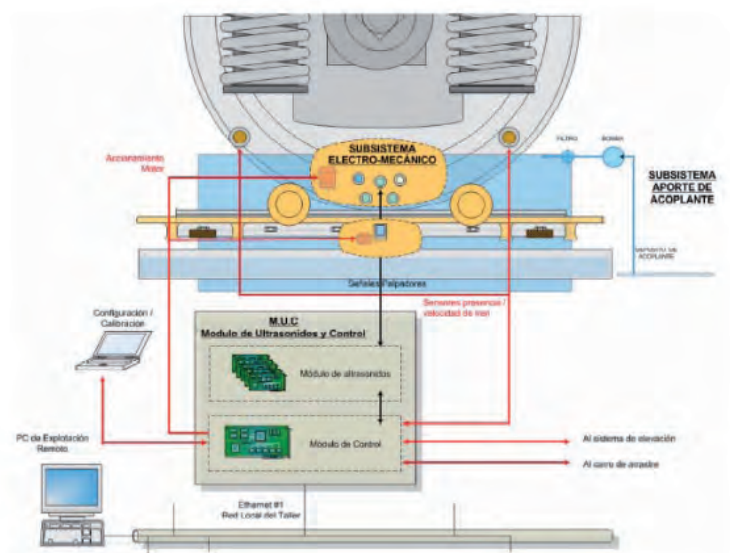


Fig. 14: Bloques funcionales del sistema de inspección. (Por simplicidad del esquema no se muestran en la imagen los subsistemas Elevador, Tractor y Óptico)

### 8.1. SUBSISTEMA DE ULTRASONIDOS

El subsistema de ultrasonidos está integrado por los tres conjuntos de palpadores descritos en el apartado 7. Estos palpadores irán montados en zapatas portapalpadores, cuya posición se controla automáticamente para implementar la estrategia de inspección planificada.

Como ya se mencionó en el apartado 7, la geometría de la rueda cambia en función del desgaste de la misma, con una variación del diámetro desde 860mm (rueda nueva) hasta un mínimo de 780mm (rueda al límite del desgaste).

Para que el sistema diseñado pueda adaptarse automáticamente a estas variaciones en el diámetro de la rueda, se han agrupado los palpadores en dos módulos, *superior e inferior*, cuya posición está referenciada al centro de la rueda y al extremo inferior de la banda de rodadura respectivamente.

Así, los palpadores que inspeccionan la zona interior del bandaje, van montados en el módulo superior, lo que asegura que siempre tengan la misma posición relativa con respecto a la superficie de interfaz entre el bandaje y la banda de goma que se sitúa entre éste y el bloque de la rueda.

El resto de palpadores, que inspeccionan el cuerpo del bandaje y la banda de rodadura, irán montados en el módulo inferior, de forma que su posición se mantenga fija con respecto a la banda de rodadura independientemente del desgaste de la rueda.

El movimiento de las zapatas portapalpadores está motorizado y se controla, de forma totalmente automática, desde el módulo de control en función de la información aportada por los sensores inductivos.

### 8.2. SUBSISTEMA DE APORTE DE ACOPLANTE

Para garantizar la correcta transmisión del sonido desde los palpadores al interior del bandaje durante la inspección, se utiliza el método de inmersión parcial en un medio acoplante (agua decantada y filtrada).

Para implementar este acoplamiento por inmersión parcial, se sumergen las zapatas portapalpadores en sendas cubetas (una para cada rueda), que se mantiene llena de acoplante. El sistema incluye una bomba de aporte en cada cubeta y sendos detectores de nivel, de modo que el subsistema de control puede mantener el nivel de acoplante adecuado en cada cubeta utilizando la información aportada por los detectores de nivel para activar o no las bombas de aporte de acoplante.

Los conjuntos de palpadores deben desplazarse verticalmente en función del diámetro de la rueda y horizontalmente para situarse con precisión en la zona de inspección. Estos ajustes de precisión se consiguen mediante sensores de posicionamiento inductivos.

En la Figura 15 se muestra el prototipo de una de las cubetas portapalpadores. La instalación constará de dos cubetas portapalpadores, una por cada rueda del eje a medir. Las cubetas portapalpadores alojan el subsistema de ultrasonidos y a su vez van montadas en el Elevador.



Fig.15: Cubeta portapalpadores

### 8.3. SUBSISTEMA DE ELEVACIÓN Y GIRO DE RUEDA

Este subsistema realiza varias funciones necesarias para la realización automática de las inspecciones:

*Eleva el eje, separando ligeramente las ruedas del rail de forma que se las pueda hacer girar libremente.*

*A la par que eleva el eje, sube las cubetas portapalpadores, de forma que las ruedas a inspeccionar queden parcialmente sumergidas en el acoplante.*

*Hace girar las ruedas, de forma que la totalidad del bandaje vaya pasando por delante de los palpadores para realizar la inspección completa de la rueda.*

Para realizar estas funciones, el elevador (ver Figura 16) cuenta con dos accionamientos principales (elevador mediante un husillo y motor de giro de ruedas) y los sensores necesarios (detectores de presencia de rueda sobre el elevador y *encoders* angulares para controlar la posición de las ruedas a inspeccionar).

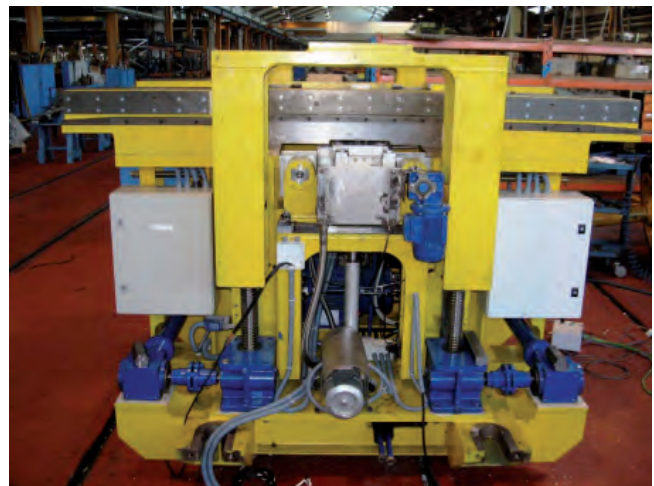


Fig.16: Elevador

### 8.4. SUBSISTEMA TRACTOR

Para que el sistema de inspección sea capaz de funcionar de manera automática, sin intervención de un conductor que



vaya posicionando cada eje de la unidad sobre el subsistema elevador, se han incluido dos carros de arrastre.

En la Figura 17 se muestra uno de estos carros de arrastre durante su instalación en el foso de vía 17 de los talleres de mantenimiento en **Hortaleza**.

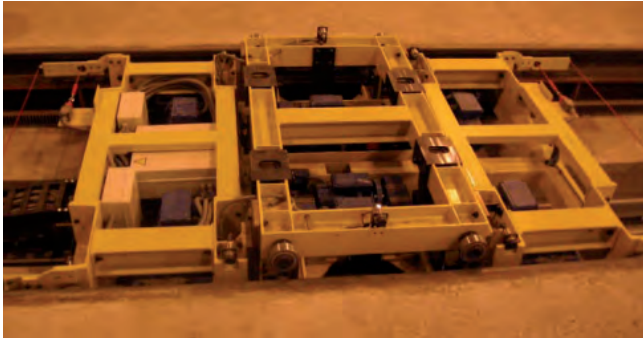


Fig. 17: Carros Tractores

Ambos carros estarán conectados al subsistema de control, que se encarga de controlar la posición de la unidad y dar las órdenes de avance y parada pertinentes a los dos carros de arrastre para ir posicionando sucesivamente cada eje sobre el elevador.

### 8.5. SUBSISTEMA ÓPTICO

Éste es un sistema de visión artificial cuya misión es identificar las unidades que van a ser inspeccionadas por el equipo de ultrasonidos.

Mediante un sistema de reconocimiento óptico de caracteres (OCR) que trabaja en tiempo real, se informa al puesto de control acerca de la unidad que va a ser

procesada, de forma que se gestione de forma automática el almacenamiento de los datos de inspección asociados al fichero de resultados de dicha unidad en la base de datos de unidades inspeccionadas.

El sistema OCR permite la identificación del tren al paso (siempre que la velocidad sea inferior a 20 km/h) y consta de una cámara situada a una cota elevada justo a la altura de las matrículas identificativas de los coches, que se activa cuando las ruedas del primer eje del tren son detectadas mediante unos sensores inductivos colocados unos pocos metros delante de la cámara.

### 8.6. SUBSISTEMA DE PROCESO Y CONTROL

El subsistema de control está integrado por el equipo de generación, captura y proceso de ultrasonidos, y el PC de operación.

El equipo de generación, captura y proceso de ultrasonidos se basa en el sistema ULTRASEN<sup>®</sup>, aportado por la empresa colaboradora externa INTERLAB, que con su tecnología modular de proceso de ultrasonidos puede configurarse para el número de canales necesarios sin merma en la velocidad o prestaciones del sistema, manteniendo su capacidad de operar en tiempo real.

Además, el equipo de ultrasonidos, mantiene el sincronismo entre el disparo de los pulsos de ultrasonidos en cada palpador y la posición angular de la rueda durante la inspección de forma que la adquisición de datos se produzca a intervalos regulares, garantizando una inspección completa y homogénea del bandaje. Para ello, los subsistemas de ultrasonidos, acoplante, elevador y tractor se controlan directamente a través del módulo de ultrasonidos.

Por otro lado, el PC de Operación, basado en un ordenador industrial, se comunicará con el equipo de ultrasonidos para

obtener los datos de la inspección, el estado de los diferentes subsistemas de la máquina, etc., junto con el envío de órdenes (inicio de inspección, activación selectiva de actuadores en modo manual, etc.).

El PC de Operación se encarga de ir almacenando los resultados de las inspecciones en la base de datos, utilizando la información aportada por el subsistema óptico para identificar cada unidad inspeccionada.

Por otra parte, el mencionado PC de operación se conecta a la red local del taller, de modo

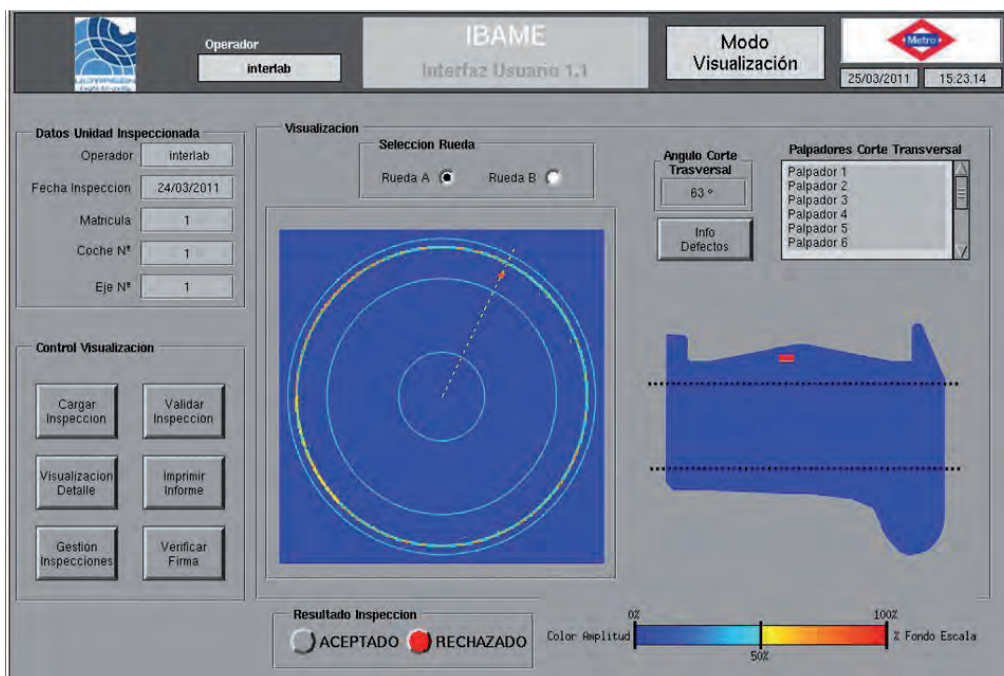


Fig. 18: Pantalla con el resultado de una inspección



que se puedan explotar los resultados de inspección de forma remota, operando el sistema de forma desatendida y gestionándose de forma automática los avisos a los técnicos especialistas en caso de que se produzca alguna incidencia.

También se podrá conectar al equipo un PC portátil para así realizar tareas propias del trabajo “a pie de vía” tales como el mantenimiento o configuración del equipo.

Aunque el sistema decide con los algoritmos internos si cada una de las ruedas cumple con los requerimientos de las normas establecidas, existen una serie de herramientas para presentar los resultados y facilitar su análisis y comparar con inspecciones previas de esa misma rueda. La figura 18 muestra un ejemplo de una de esas pantallas donde se presenta un C-Scan de la rueda con un B-Scan de una sección marcada por el cursor.

## 9. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un sistema integral para la inspección automática de ruedas elásticas que consigue una serie de ventajas sobre los sistemas existentes que se resumen en los siguientes puntos:

Permite la inspección sin necesidad de personal cualificado para la realización de la misma.

Efectúa el diagnóstico del estado del bandaje de las ruedas en tiempo real.

Genera una base de datos con los resultados de las inspecciones que puede ser consultada a distancia a través de la red informática de la explotación.

- Dispone de una estrategia de inspección específica orientada hacia la evaluación completa de todas las zonas críticas del bandaje de las ruedas, diferenciando zonas según el tipo y el origen de los defectos encontrados.
- Aumenta la fiabilidad del diagnóstico al realizar un análisis automático, eliminando de esta forma la posibilidad del fallo humano, como puede ser la incorrecta disposición del equipo de ultrasonidos o la posibilidad de que pueda quedarse alguna zona de la rueda sin inspeccionar convenientemente.
- Proporciona diagnosis automática en tiempo real del estado de la rodadura, con la información en tiempo real el sistema generará por sí mismo una base de datos a disposición del personal técnico, que no tendrá que desplazarse para poder ver los resultados del ensayo.
- Automatiza el proceso de inspección, al situar el tren a inspeccionar en un punto determinado, el sistema es capaz de operar de forma totalmente desatendida mediante la activación de un pulsador.
- Reduce el tiempo de indisponibilidad, el nuevo sistema remolca el tren automáticamente mediante dos carros de arrastre que se detienen automáticamente al paso de cada eje por la instalación de inspección para, una vez realizada la medida activar de nuevo los carros de

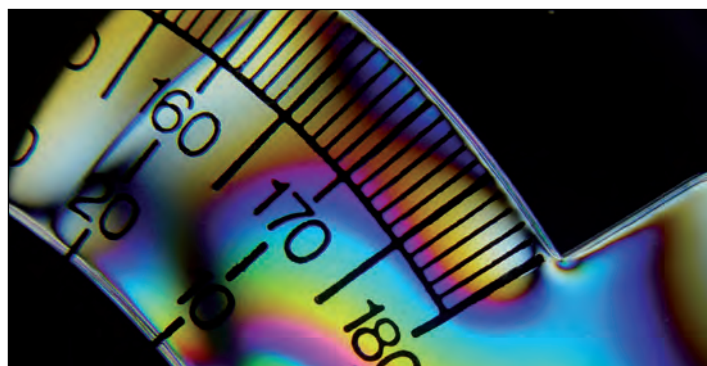
arrastre. De esta forma el tiempo de indisponibilidad de la unidad se reducirá drásticamente hasta el orden de unos minutos.

- Realiza un mantenimiento predictivo, ante defectos incipientes en una rueda, se pueden establecer estrategias de inspección para observar la progresión de la posible fisura en el tiempo y establecer el plan de cambio de ejes en paralizaciones programadas del coche afectado, optimizando el mantenimiento.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- UNE-EN 13262. Aplicaciones ferroviarias, ejes montados, bogies, ruedas, requisitos de producto.
- UIC 810-1. Especificaciones Técnicas para el suministro de bandajes para material rodante motor y remolcado.
- González-Fernández FJ. *Ingeniería Ferroviaria*. Universidad Nacional de Educación a Distancia. 2ª edición 2010. 674 p. ISBN: 978-84-362-6074-8
- González-Fernández FJ, Melis-Maynar M. *Ferrocarriles Metropolitanos: tranvías, metros ligeros y metros convencionales* 3ª edición 2009. 650 p. ISBN 84-380-0287-0
- González-Fernández FJ. *Teoría y práctica del Mantenimiento Industrial Avanzado*. FC Editorial 3ª edición 2009. 597 pag. ISBN 978-84-96743-92-2
- González-Fernández FJ. *Reducción de costes y mejora de resultados en mantenimiento* FC Editorial 2010. 331 pág. ISBN 978-84-92735-34-1
- UNE-EN 473. Ensayos no destructivos, Cualificación y certificación del personal que realiza ensayos no destructivos.
- ISO 5948. Railway rolling stock material-Ultrasonic acceptance testing.
- UNE-EN 13715 Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Ruedas. Perfil de rodadura.
- Ferrer-Jiménez C, Amigó-Borras V. *Tecnología de Materiales*. Universidad Politécnica de Valencia. Editorial UPV. 560 p. ISBN: 84-9705-363-X.
- Molina-Sánchez B. "Estudio de la creación, desarrollo y método de detección de grietas en ruedas ferroviarias". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- ISO 1005. Railway rolling stock material. Part1: Rouge-rolled tyres for tractive and training stock. Technical delivery conditions
- UNE-EN 12.668-1. Ensayos no destructivos. Caracterización y verificación del equipo de examen de ultrasonidos. Parte 1: Aparatos.
- UNE-EN 12.668-2. Ensayos no destructivos. Caracterización y verificación del equipo de examen de ultrasonidos. Parte 2: Palpadores.
- UNE-EN 12.668-3. Ensayos no destructivos. Caracterización y verificación del equipo de examen de ultrasonidos. Parte 3: Equipo completo.

# Fotoelasticimetría: Modernizando una vieja técnica



Manuel Solaguren-Beascoa Fernández    Doctor Ingeniero Industrial

Universidad de Burgos. Escuela Politécnica Superior. Avda. de Cantabria, s/n  
- 09006 Burgos. Tfno: +34 947 258920. msolaguren@ubu.es

Recibido: 28/10/2010 • Aceptado: 21/03/2011

## Photoelasticimetry: Upgrading an old technique

### ABSTRACT

- Among the various strain measurement techniques, photoelasticity is one of the oldest and, in turn, more versatile and powerful. In recent years, important contributions are being carried out, which are transforming this technique in a modern measurement tool: software is being developed to implement it easily and without a highly skilled operator, and standards have been developed for the calibration of equipments, which will allow express measurements with their corresponding uncertainties, making them valid, comparable and reproducible. Moreover, significant progresses are being made in the use of stereolithography for the manufacture of photoelastic models, as well as their use for three-dimensional analysis by tomographic photoelasticity. This article describes all these contributions in order to provide potential users the understanding of the different photoelastic techniques, the extent to which these are developed and commercially available and their application possibilities.
- **Keywords:** experimental techniques, photoelasticity, stress, strain, metrology, uncertainty.

### RESUMEN

Dentro de las diferentes técnicas experimentales de medida de deformaciones, la fotoelasticimetría es una de las más antiguas y, a la vez, más versátiles y potentes. En los últimos años se están produciendo importantes aportaciones que están haciendo de esta técnica una moderna herramienta de medida: se están desarrollando programas informáticos para aplicarla de forma sencilla y sin necesidad de un operador altamente cualificado, y se han elaborado normativas para la calibración de los equipos, lo cual permitirá expresar las medidas con sus correspondientes incertidumbres, haciéndolas válidas, comparables y reproducibles. Por otra parte, se están realizando avances relevantes en el empleo de la estereolitografía para la fabricación de modelos, así como en el uso de éstos para su análisis tridimensional mediante fotoelasticimetría tomográfica. Este artículo describe todas estas contribuciones con el propósito de facilitar a los potenciales usuarios la comprensión de las diferentes técnicas fotoelasticimétricas, el grado en que

éstas se encuentran desarrolladas y disponibles comercialmente, así como sus posibilidades de aplicación.

**Palabras clave:** técnicas experimentales, fotoelasticidad, tensión, deformación, metrología, incertidumbre.

### 1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas experimentales de medida de deformaciones tienen numerosas aplicaciones industriales (Figura 1), que van desde la caracterización de materiales o la validación de cálculos sobre prototipos, hasta la monitorización del comportamiento de grandes estructuras a lo largo de su vida útil.

Numerosas empresas ofrecen actualmente equipos de medida de deformaciones basados en dispares tecnologías, promocionándose como rápidos, precisos o de fácil manejo. La técnica más utilizada (Figura 2) - por ser sencilla, barata y suficientemente precisa - es la extensometría eléctrica, pero presenta el inconveniente de proporcionar una información puntual, de modo que

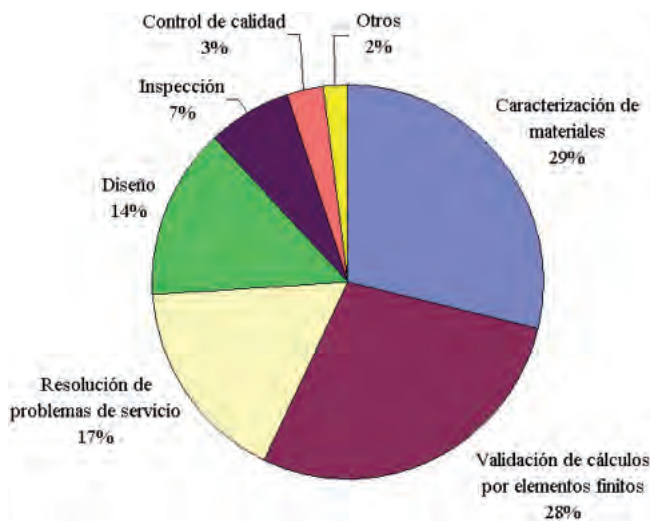


Fig. 1: Áreas de aplicación industriales de las diferentes técnicas experimentales de medida de tensiones/deformaciones (datos del año 2006 procedentes del JSEM, Japan Society for Experimental Mechanics, www.jssem.jp).

para obtener una imagen completa del comportamiento mecánico de un elemento estructural es necesaria una instrumentación con gran número de galgas. Del resto de técnicas tienen especial interés las de campo completo, es decir, aquéllas que permiten obtener una visión general del estado de deformación sobre la superficie de la pieza objeto de análisis. Entre ellas, la fotoelasticimetría fue una de las primeras técnicas en surgir, allá por la década de 1930, y desde entonces se ha empleado con éxito en prácticamente todos los campos de la ingeniería. Aunque posteriormente surgieron otras técnicas ópticas de campo completo menos intrusivas, basadas en la interferometría y en el láser, la fotoelasticimetría mantiene la particularidad de ser la única técnica que permite medir el estado de deformaciones en todo el volumen tridimensional de un componente. Si bien de

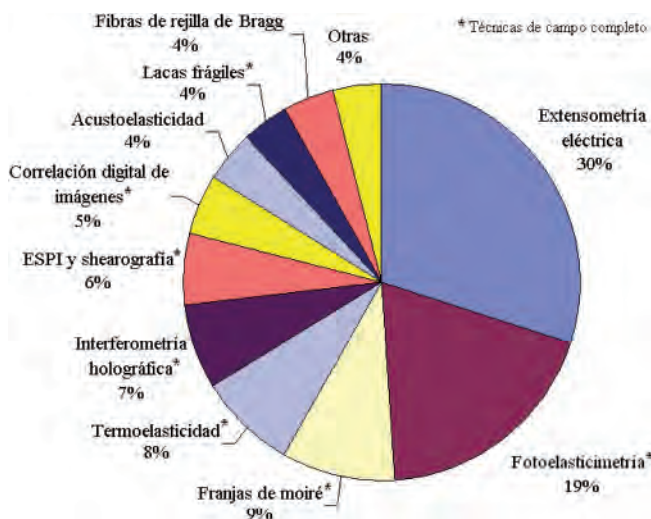


Fig. 2: Grado de utilización en la industria de las diferentes técnicas de medida de tensiones y deformaciones (datos procedentes del JSEM, 2006).

momento su aplicación tridimensional es lenta y laboriosa, su aplicabilidad está mejorando gracias a los avances que se están produciendo actualmente.

Un aspecto común a todas las técnicas experimentales de medida de deformaciones, que hasta el momento ha permanecido en el olvido, es el metrológico. No existen normas estandarizadas para la calibración de los equipos, lo cual supone un importante obstáculo al uso con validez y calidad de las medidas realizadas con dichas técnicas. También se están produciendo avances en este sentido.

En este artículo se revisa la evolución de la fotoelasticimetría y las recientes aportaciones (tanto técnicas como de normativa) que están transformándola en una técnica moderna y con posibilidades de aplicación excepcionales.

## 2. LAS TÉCNICAS FOTOELASTICIMÉTRICAS Y SU EVOLUCIÓN

La fotoelasticimetría es una técnica basada en la utilización de materiales fotoelásticos. Estos materiales transparentes se caracterizan por ser ópticamente isótropos cuando no están sometidos a deformación; sin embargo, al deformarlos se comportan como birrefringentes, es decir, producen doble refracción de la luz. El resultado de la visualización de estos materiales cuando están deformados a través de un polariscopio es la aparición de unos patrones de franjas, conocidas como isoclinas e isocromas. Dichas franjas suelen ser fotografiadas o grabadas en vídeo para su posterior análisis.

Como ya hemos adelantado, esta técnica permite una serie de posibilidades que no son posibles con otras: permite el análisis del interior de las piezas, no sólo de su superficie. Esto se consigue fabricando con material fotoelástico un modelo tridimensional a escala del elemento a analizar y sometiéndolo simultáneamente a carga y a un tratamiento térmico de horneado que lo endurece. Este tratamiento, conocido como de “congelación de tensiones”, deja así permanentemente la huella de deformaciones de la sollicitación. Mediante su posterior corte en rebanadas es posible analizar el estado interior de deformaciones en el modelo.

En general, hay dos tipos de técnicas que hay que aplicar a la hora de realizar medidas mediante fotoelasticimetría:

- Las “técnicas de adquisición de datos” analizan las imágenes del polariscopio para obtener, en cada punto de la pieza, dos parámetros: a partir de las franjas isoclinas se determina el ángulo  $\alpha$  de orientación de las direcciones principales del estado de deformaciones; y mediante las franjas isocromas, el orden de franja  $N$ , proporcional a la diferencia de deformaciones principales.
- Las “técnicas de separación de tensiones” utilizan los datos obtenidos mediante las técnicas anteriores para determinar los valores de las tensiones/deformaciones principales por separado.



## EQUIPOS Y TIPOS DE ANÁLISIS EN FOTOELASTICIMETRÍA

Un polariscopio es un instrumento que permite observar y medir el estado de polarización de objetos transparentes. Existen distintas disposiciones de filtros que constituyen un polariscopio:

- El polariscopio más simple, llamado lineal o plano, consta de dos filtros polarizadores entre los cuales se coloca el material fotoelástico a analizar. Con él se observan las franjas isoclinas e isocromas superpuestas.
- Intercalando dos filtros de cuarto de onda en la disposición del polariscopio plano se obtiene el denominado polariscopio circular, el cual permite ver únicamente las franjas isocromas.

Asimismo, es posible realizar dos tipos distintos de análisis:

- En los análisis de transmisión se fabrica con material fotoelástico un modelo de la pieza a analizar (a tamaño real o a escala), se le somete a carga de la misma forma que la pieza original, se ilumina por un lado con luz polarizada y se observa por el otro a través de un polariscopio.
- En los análisis de reflexión, con un adhesivo reflectante se pega sobre la pieza a analizar un recubrimiento de material fotoelástico. Una vez que la pieza se encuentra bajo carga, dicho recubrimiento es iluminado con luz polarizada y observado a través de un polariscopio.



### 2.1. TÉCNICAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Desde las primeras aplicaciones prácticas de la fotoelasticimetría, allá en la década de 1930, han surgido

una gran cantidad de técnicas de adquisición de datos [1] con el propósito de proporcionar un rápido y preciso análisis de las franjas isoclinas e isocromas (Tabla 1). Algunas de las

	Técnica	Año	Difusión
<b>Manuales</b>	Aparatos compensadores	1930s	Comercializada
	Compensación goniométrica	1930s	Comercializada
	Fringe Skeletonization	1950	Obsoleta
	Fringe Sharpening	1955	Obsoleta
	Polariscopios automatizados	1959	Obsoleta
<b>Automatizadas de primera generación</b>	Fringe Multiplication	1970	Obsoleta
	Fringe Thinning	1979	Obsoleta
	Half Fringe Photoelasticity	1983	Obsoleta
	Spectral Content Analysis	1985	Obsoleta
	Digital Fringe Multiplication	1990	Obsoleta
<b>Automatizadas de segunda generación</b>	Phase Shifting o Phase Stepping	1986	Comercializada
	Fourier Transform	1993	No comercial
	Digital Spectral Content Analysis	1995	No comercial
	RGB Photoelasticity	1995	No comercial
	Tricolor Photoelasticity	1998	No comercial

Tabla 1: Principales técnicas de adquisición de datos

más antiguas han quedado obsoletas por la aparición de otras mejores; sin embargo otras han mantenido su aplicabilidad debido fundamentalmente a su simplicidad y bajo coste. Así, por ejemplo, el compensador de **Babinet-Soleil** es todavía comercializado por la marca *Vishay* para la medida puntual del orden de franja, mientras que todas las técnicas que denominamos “automatizadas de primera generación” sólo tienen interés histórico por ser la base de las actuales técnicas digitales.

La última meta perseguida por los investigadores ha sido la adquisición de datos automatizada de campo completo. Las técnicas “*Phase Shifting*” [2], “*Fourier Transform*” [3], “*Digital Spectral Content Analysis*” [4], “*RGB*” [5] y “*Tricolor*” [6] han alcanzado esta meta. Algunas dieron lugar a prototipos que incluso han alcanzado difusión comercial [7-9].

Sin embargo, cada método posee sus propias ventajas y limitaciones, no existiendo una única técnica óptima para todas las situaciones. La técnica “*Phase Shifting*” combinada con otras basadas en el uso del color, como “*RGB*” o “*Tricolor*” [10-12] son las que parecen tener mayores posibilidades. Estas técnicas mixtas son relativamente sencillas y evitan ciertos errores inherentes a cada una de ellas por separado. No obstante, su salto de la investigación a la industria requiere algo más. Los fabricantes de equipos comerciales demandan técnicas simples, en las que la intervención de un experto operador sea mínima, y esto es lo que frena de momento su difusión comercial. Aún requieren procesos de ajuste, calibración o resolución de ambigüedades que no pueden ser llevados a cabo por cualquier usuario.

Técnica	Año	Difusión
Integración de las ecuaciones de equilibrio	1931	No comercial
Integración de las ecuaciones de Lamé-Maxwell	1931	No comercial
Método del agujero	1932	No comercial
Separación por incidencia oblicua	1943	Comercializada
Separación mediante las franjas isopacas	1955	No comercial
Utilización de un recubrimiento en tiras	1965	No comercial
Solución de la ecuación de compatibilidad	1966	Limitada
Utilización de una galga extensométrica	1986	Comercializada
Corte del recubrimiento fotoelástico	1987	Comercializada
Combinación con termoelasticidad	1996	Limitada

Tabla 2: Principales técnicas de separación de tensiones

## 2.2. TÉCNICAS DE SEPARACIÓN DE TENSIONES

El orden de franja  $N$  es proporcional a la diferencia de tensiones/deformaciones principales en cada punto. Aunque esta información puede ser suficiente en algunas disciplinas, como la mecánica de fractura, para muchas aplicaciones prácticas es necesario conocer los valores de las tensiones/deformaciones principales por separado. Para ello se necesita una ecuación más, aparte de su diferencia. Esto es lo que buscan las denominadas técnicas de separación de tensiones [13].

Para hallar los valores de las tensiones principales por separado surgieron diversas técnicas de separación, (Tabla 2). Todas ellas presentan características que las hacen no viables bajo determinadas circunstancias: no todas pueden ser aplicadas en análisis de transmisión y reflexión, ni sobre el campo completo de tensiones/deformaciones; algunas de ellas deterioran el material fotoelástico; otras técnicas son complejas por requerir la aplicación de tecnologías basadas en otros fenómenos físicos; y sólo unas pocas, las más sencillas, han alcanzado desarrollo comercial.

El método del agujero, la separación por incidencia oblicua, por galga extensométrica y por corte del recubrimiento son técnicas puntuales, mientras que el resto pueden ser aplicables en el campo completo, lo cual es una importante y deseable característica. Entre éstas últimas, la técnica de integración de las ecuaciones de equilibrio es la que en la actualidad presenta un mayor potencial para su desarrollo comercial. Es barata porque no se necesita equipamiento especial para su uso, y su aplicación en el campo completo está únicamente limitada por el requerimiento de un punto en un borde libre o, en su ausencia, un punto del que se conozca su estado tensional (lo cual puede conseguirse mediante una galga extensométrica). En busca de una herramienta más potente y versátil que las actualmente comercializadas, los esfuerzos de los investigadores se centran en el desarrollo de un software que integre la adquisición de datos y la separación de tensiones en el campo completo [14-16].

## 3. RECIENTES APORTACIONES

La fotoelasticimetría se ha empleado con éxito en numerosas aplicaciones, prácticamente en todos los campos de la ingeniería, desde edificios, puentes o aviones hasta motores y válvulas. A pesar de que su historia se remonta 150 años, a las observaciones de Brewster, en todo este tiempo ha habido largos períodos de relativa quiescencia. El primero abarcó desde el descubrimiento inicial de fenómeno fotoelástico hasta que fue posible disponer de los polímeros necesarios para su aplicación práctica, en la década de 1930. El desarrollo del policarbonato y de las resinas epoxi en la década de 1960 como materiales para recubrimientos fotoelásticos supuso un fuerte impulso que revolucionó sus aplicaciones prácticas. Su versatilidad permitía repetir o modificar las condiciones de carga así como realizar

## FRANJAS ISOCLINAS E ISOCROMAS

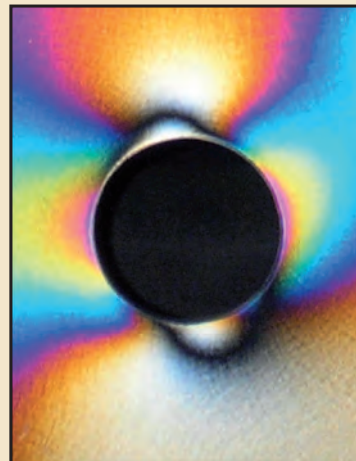
Dos son los tipos de franjas que proporcionan información sobre el estado de deformación en un punto:

- Las isoclinas son una serie de franjas negras que aparecen sobre el material fotoelástico al ser observado a través de un polariscopio plano. Pueden definirse como el lugar geométrico de los puntos que tienen una misma orientación  $\alpha$  de sus direcciones principales.

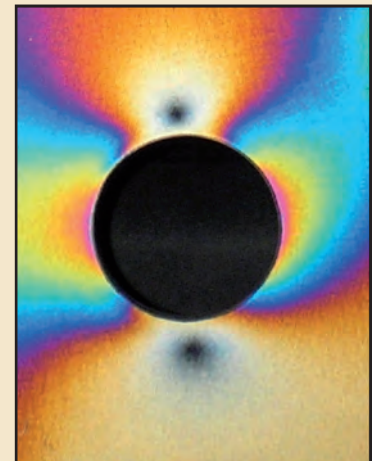
- Las franjas isocromas son una serie de franjas coloreadas (si se ilumina con luz blanca) que aparecen sobre el material fotoelástico al ser observado, bien a través de un polariscopio plano, o bien a través de un polariscopio circular. En el primer caso, aparecen en combinación con las isoclinas. Su color corresponde con un determinado orden de franja  $N$ , relacionado con la diferencia de deformaciones principales mediante la ley de Brewster:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{N\lambda}{hK}$$

Siendo  $\lambda$  la longitud de onda media de la luz empleada,  $h$  el espesor de material fotoelástico atravesado por ésta y  $K$  el coeficiente óptico de deformaciones del material.



a) Polariscopio plano



b) Polariscopio circular

medidas tanto en laboratorio como en campo. Un segundo periodo de quiescencia comenzó con la aparición del método de los elementos finitos (MEF). Su profusa utilización con los avances de la informática a partir de la década de 1980 redujeron el uso y desarrollo de técnicas experimentales como la fotoelasticimetría. Actualmente, los recientes avances, como el uso de diodos láser y LED como fuentes de luz o el desarrollo de las técnicas de procesamiento de imágenes, han ampliado sus posibilidades de aplicación y hacen que esté ganando de nuevo popularidad (monitoreo on-line de estructuras, análisis de tensiones residuales en vidrio, plásticos o componentes microelectrónicos, o visualización dinámica de las ondas de tensiones). El futuro de esta técnica se presenta prometedor, y dos son los aspectos responsables de ello: el perfeccionamiento de la estereolitografía para la fabricación de modelos de resina epoxi y el desarrollo de software para la automatización del análisis de los datos. Ninguna de estas dos tecnologías están aún lo suficientemente maduras como para ser utilizadas por cualquier laboratorio o empresa, sin embargo ambas ofrecen un gran potencial en la medida tridimensional de deformaciones.

La estereolitografía permite fabricar modelos tridimensionales en resina epoxi directamente a partir de sus diseños por ordenador, sin el empleo de las herramientas y técnicas tradicionales de moldeo [17]. Para ello se emplea un depósito lleno de resina líquida fotopolimerizante dentro del cual puede moverse verticalmente un plato metálico (Figura 3). Un láser montado encima del depósito va polimerizando capa a capa la resina hasta conseguir el modelo. Las

resinas epoxi empleadas son fotoelásticas, de modo que la estereolitografía posibilita fabricar modelos fotoelásticos de componentes complejos con una rapidez similar a la de los modelos numéricos que utiliza el MEF. Sin embargo, actualmente los modelos así obtenidos a menudo contienen elevados e inaceptables niveles de birrefringencia residual que no puede eliminarse completamente mediante un tratamiento posterior de recocido. Diversas investigaciones [18, 19] tratan de superar este inconveniente mediante el

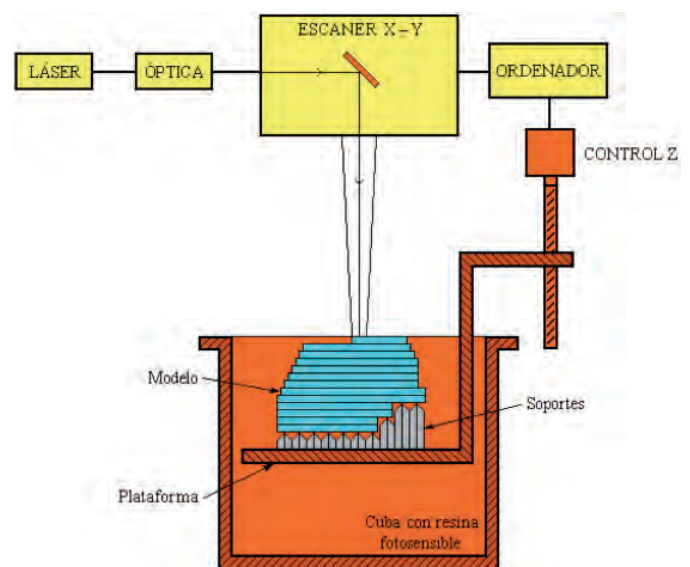


Fig. 3: Esquema del proceso de modelado por estereolitografía



empleo de nuevas generaciones de resinas. De momento, los modelos generados mediante estereolitografía pueden ser usados como modelos maestros para la fabricación rápida de moldes de silicona y, a partir de ellos, obtener modelos fotoelásticos con el tradicional y más lento método de moldeo.

El modelado rápido debe ser complementado con un rápido análisis de los datos para que la fotoelasticimetría tridimensional pueda llegar a ser una técnica económicamente viable. Como se ha comentado en el apartado anterior, numerosas investigaciones actuales centran sus esfuerzos en el desarrollo de un software que implemente conjuntamente una técnica de adquisición de datos y una de separación de tensiones [20]. El objetivo: la comercialización de equipos fácilmente operables que obtengan medidas de deformaciones directamente a partir de las imágenes captadas por el polariscopio.

Todos estos avances aún dejan de lado un mayor inconveniente que presenta la fotoelasticimetría tridimensional: la necesidad de “congelar las tensiones” y seccionar el modelo en rodajas para su análisis. Aparte del trabajo que ello conlleva, traducido en tiempo y costes, implica que sólo puede analizarse un estado de carga con cada modelo. Para evitar estos inconvenientes, se ha investigado desde hace tiempo en fotoelasticimetría tomográfica (obtención de las tensiones internas en modelos tridimensionales mediante la captura y combinación de imágenes fotoelasticimétricas desde distintos puntos de vista), pero la técnica fue considerada como demasiado compleja para su uso generalizado [21]. Los nuevos avances en tomografía tensorial van salvando las dificultades [22-26]; no obstante, la fotoelasticimetría tomográfica no es todavía viable técnicamente.

#### 4. UN ASPECTO PENDIENTE: EL METROLÓGICO

Las actividades metrológicas son fundamentales para garantizar la calidad de las actividades científicas e industriales. La norma ISO/IEC 17025:2005 [27] exige que toda medida vaya acompañada por su incertidumbre de medida. Sin embargo, el cálculo de la incertidumbre de medida es inútil si ésta carece de trazabilidad, y esto es lo que ha sucedido durante décadas con las técnicas ópticas de medida de deformaciones. La trazabilidad es una propiedad del resultado de una medición por la que ésta puede relacionarse con un patrón de referencia nacional o internacional a través de una cadena ininterrumpida de comparaciones, todas con sus correspondientes incertidumbres (Figura 4). Así, si en una empresa se utiliza un pie de rey, la incertidumbre de las medidas con él realizadas es evaluable a partir de su certificado de calibración y, por ejemplo, puede afirmarse que la longitud de una determinada pieza es de  $2,34 \pm 0,01\text{mm}$  con un 95% de probabilidad. La calibración del aparato de medida se realiza por un laboratorio acreditado mediante un juego de bloques patrón, y el laboratorio, a su vez, habrá calibrado éstos mediante interferometría a partir

de la definición internacional de la unidad de medida, el metro en este caso. De este modo, la cadena de trazabilidad asegura que las incertidumbres de las medidas realizadas con el pie de rey se refieran a la unidad de medida aceptada internacionalmente y sean, por tanto, válidas, comparables y reproducibles.

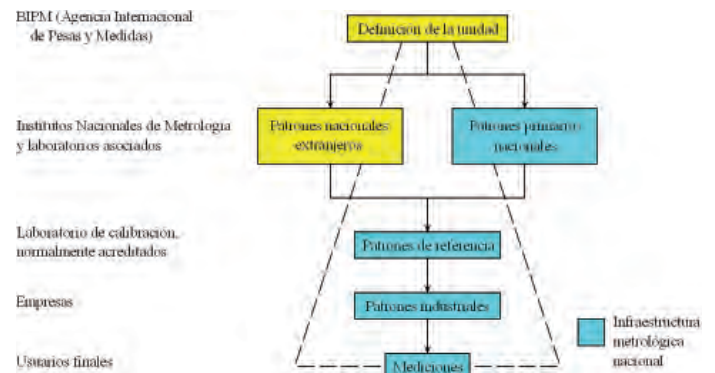


Fig. 4: Cadena de trazabilidad

Hasta ahora no se habían definido unas normas que estableciesen los materiales de referencia para la calibración de los sistemas ópticos de medida de deformaciones y las rutas de trazabilidad hacia un patrón primario. Para cubrir esta carencia, en 2007, elaborado por el consorcio europeo SPOTS (Standardization Project for Optical Techniques of Strain Measurement) en el marco del proyecto VAMAS (Versailles Agreement on Materials and Standards), concluyó el desarrollo de un borrador de normativa que asegurará la trazabilidad de las medidas realizadas con éstas técnicas. Tras la aprobación por parte del comité ejecutivo del VAMAS, el borrador está siendo considerado por ISO (*International Organization for Standardization*) para su posible publicación como norma internacional.

El documento elaborado por SPOTS tiene por título “Calibración y evaluación de las técnicas ópticas de medidas de deformaciones” y se divide en tres partes:

- La primera parte [28] describe los materiales y procedimientos a utilizar para la calibración de los instrumentos ópticos utilizados para medir deformaciones. La calibración implica la comparación de las medidas realizadas con los instrumentos con respecto a un patrón local, lo que constituye el primer eslabón de la cadena de trazabilidad hacia un patrón primario.
- La segunda parte [29] describe los materiales y procedimientos a utilizar para evaluar y comparar la aptitud de cada una de las diferentes técnicas; lo cual es de importancia para los diseñadores de los sistemas y sus algoritmos, para los fabricantes respecto a su calidad, para los compradores a la hora de comparar las posibilidades de cada técnica y para los usuarios finales en la puesta a punto y mantenimiento de la instrumentación.

## EVALUACIÓN DE INCERTIDUMBRES DE MEDIDA

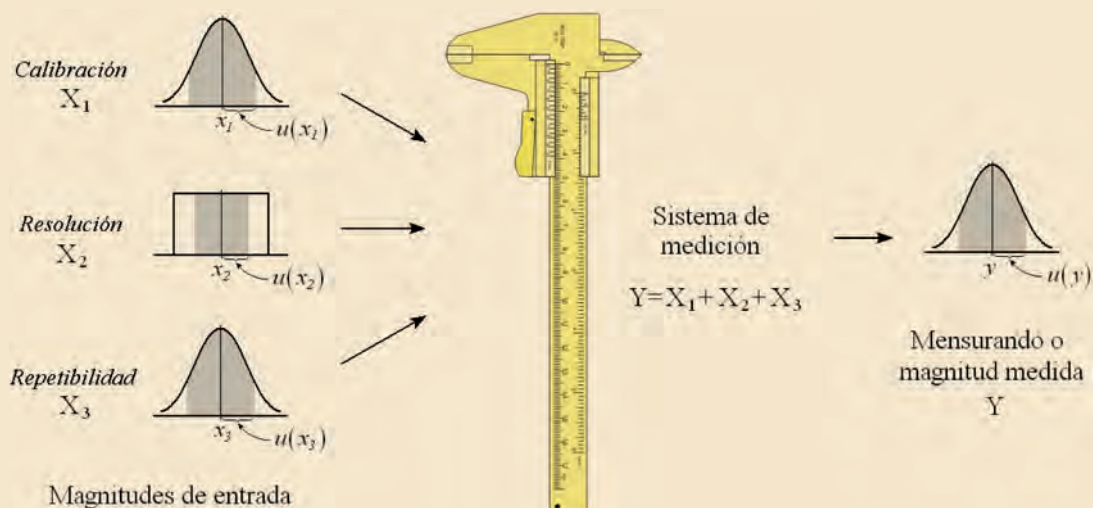
La incertidumbre de medida es un parámetro que permite estimar el intervalo de valores dentro del cual es de esperar que se encuentre, con una determinada probabilidad, el resultado de la medición. Evaluada su incertidumbre, una medida se expresa como:

$$Y = y \pm U(y)$$

En donde "Y" es la magnitud medida o mensurando, "y" la estimación o resultado de la medición y "U(y)" la llamada incertidumbre expandida de medida.

Los métodos para la evaluación de incertidumbres de medida parten de la idea de que la medición es un proceso en el que a partir de unas magnitudes  $X_i$  (aquellas que influyen en el resultado de la medición [31, 32], denominadas de entrada) se determina el valor del mensurando Y (denominada magnitud de salida). Todas se consideran variables aleatorias. Dos son los métodos de evaluación de incertidumbres aceptados internacionalmente: GUF (*Guide to the expression of Uncertainty in measurement Framework*) [33] y MCM (*Monte Carlo Method*) [34].

- El GUF es un método determinista basado en la combinación matemática de distribuciones de probabilidad, a través de la ley de propagación de incertidumbres y del teorema central del límite.
- El MCM es un método probabilístico que realiza la combinación de distribuciones de probabilidad por simulación numérica, mediante sistemas de cómputo para la generación de números aleatorios.



- La tercera parte [30] constituye una serie de guías de buenas prácticas de uso de cada una de las técnicas. Estas guías recopilan información procedente sobre todo de los fabricantes de equipos y describen las técnicas con el suficiente detalle para permitir planificar y ejecutar medidas así como interpretar los resultados.

Una vez que esta normativa entre en vigor y los laboratorios de calibración estén en condiciones de aplicarla, la trazabilidad de las medidas quedará asegurada a través de sus dos pilares básicos: el reconocimiento de la competencia metrológica en cada nivel de la cadena de trazabilidad y la calibración de los instrumentos de medida. Con ello será posible evaluar la incertidumbre de las medidas realizadas, lo que supondrá un importante estímulo para la difusión de estas técnicas en la industria.

## 5. CONCLUSIONES

Aunque la fotoelasticimetría es una técnica antigua para la medida de tensiones y deformaciones, está alcanzando su madurez en los últimos años gracias a los avances recientes en diversos campos: por un lado, el perfeccionamiento de las técnicas computerizadas de procesamiento de imágenes en busca de programas informáticos que hagan posible medir de forma simple, integrando tanto la adquisición de datos como la separación de tensiones, por otro, la redacción de normativa para asegurar la trazabilidad de las medidas y la expresión de éstas con su correspondiente incertidumbre; y con vistas a un futuro no muy lejano, el uso de la estereolitografía para la fabricación de modelos y el desarrollo de la fotoelasticimetría tomográfica, que permitirá analizar piezas en todo su volumen sin necesidad de seccionarlas.

Todos estos avances están transformando a la fotoelasticimetría en una técnica moderna cuyas posibilidades de aplicación están creciendo: ensayos estáticos, dinámicos, análisis de fatiga o test de impacto, tanto en geometrías y estados de carga complejos como en materiales homogéneos, heterogéneos o compuestos. Además, la sencillez de los equipos la hacen ventajosa económicamente frente a otras técnicas experimentales.

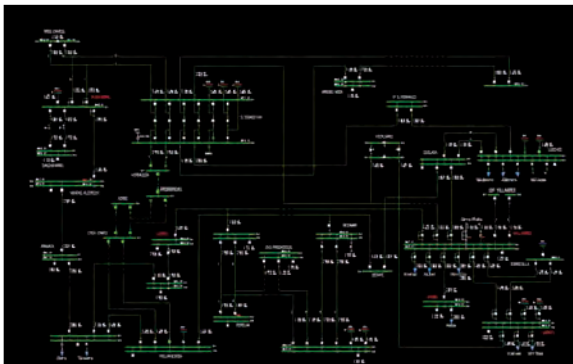
El propósito de este artículo ha sido el de presentar las diferentes técnicas, tanto de adquisición de datos como de separación de tensiones, las recientes aportaciones que se están produciendo en la actualidad y las líneas de investigación que se encuentran abiertas. Se ha pretendido así facilitar a los potenciales usuarios la comprensión de las diferentes técnicas fotoelasticimétricas, el grado en que éstas se encuentran desarrolladas y disponibles comercialmente, así como sus posibilidades de aplicación.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Solaguren-Beascoa Fernández M. "Data acquisition techniques in photoelasticity". *Experimental Techniques*. 2010. (aceptado para su publicación, doi: 10.1111/j.1747-1567.2010.00669.x).
- Hecker F W y Morche B. "Computer-aided measurement of relative retardations in plane photoelasticity". En: *Experimental Stress Analysis*. Dordrecht (Holanda): Wieringa ed. 1986. p. 535-542.
- Quan C, Bryanston-Cross P J y Judge T R. "Photoelasticity stress analysis using carrier fringe and FFT techniques". *Optics and Lasers in Engineering*. 1993. Vol.18 p. 79-108.
- Haake S J y Patterson E A. "Photoelastic analysis using automated polariscopes". En: *Proceeding of the International Conference on Mechanics of Solids and Materials Engineering* (Singapore, 5-7 de Junio de 1995). 1995. p. 884-888.
- Ajovalasit A, Barone S y Petrucci G. "Towards RGB photoelasticity: full-field automated photoelasticity in white light". *Experimental Mechanics*. 1995. Vol.35-3 p.193-200.
- Yoneyama S, Shimizu M, Gotoh J y Takashi M. "Photoelastic analysis with a single tricolour image". *Optics and Lasers in Engineering*. 1998. Vol.29 p.423-435.
- Yoneyama S, Morimoto Y, Nomura T, Fujigaki M y Matsui R. "Real-time analysis of isochromatics and isoclinics using the phase shifting method". *Experimental Mechanics*. 2003. Vol.43-1 p.83-89.
- Hobbs J W, Greene R J y Patterson E A. "A novel instrument for transient photoelasticity". *Experimental Mechanics*. 2003. Vol.43-4 p.403-409.
- Lesniak J R, Zhang S J y Patterson E A. "Design and evaluation of the poleidoscope: A novel digital polariscope". *Experimental Mechanics*. 2004. Vol.44-2 p.128-135.
- Jones I A y Wang P. "Complete fringe order determination in digital photoelasticity using fringe combination matching". *Strain*. 2003. Vol. 39-3 p.121-130.
- Ajovalasit A, Petrucci G y Scafidi M. "Phase shifting photoelasticity in white light". *Optics and Lasers in Engineering*. 2007. Vol.45-5 p. 596-611.
- Pinit P y Umezaki E. "Digitally whole-field analysis of isoclinic parameter in photoelasticity by four step colour phase-shifting technique". *Optics and Lasers in Engineering*. 2007. Vol.45-7 p. 795-807.
- Solaguren-Beascoa Fernández M, Alegre Calderón J M, Bravo Díez P M y Cuesta Segura I I. "Stress-separation techniques in photoelasticity: a review". *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2010. Vol.45-1 p.1-17.
- Ramji M y Ramesh K. "Stress separation in digital photoelasticity, Part A – photoelastic data unwrapping and smoothing". *Journal of Aerospace Science and Technology*. 2008. Vol.60-1 p.5-15.
- Ramji M y Ramesh K. "Stress separation in digital photoelasticity, Part B – whole field evaluation of stress components". *Journal of Aerospace Science and Technology*. 2008. Vol.60-1 p.16-25.
- Ashokan K y Ramesh K. "An adaptive scanning scheme for effective whole field stress separation in digital photoelasticity". *Optics and Laser Technology*. 2009. Vol.41-1 p.25-31.
- Curtis J, O'Brien E W y Patterson E A. "Stereolithography for photoelastic analysis". *Proceedings of the SEM Spring Conference on Experimental and Applied Mechanics*. (Houston, Texas, 1-3 de Junio de 1998). 1998. p.252-253.
- Curtis J D, Hanna S D, Patterson E A y Taroni M. "On the use of stereolithography for the manufacture of photoelastic models". *Experimental Mechanics*. 2003. Vol.43-2 p.148-162.
- Karalekas D E y Agelopoulos A. "On the use of stereolithography built photoelastic models for stress analysis investigations". *Materials & Design*. 2006. Vol.27-2 p.100-106.
- Ramji M y Ramesh K. "Whole field evaluation of stress components in digital photoelasticity – issues, implementation and application". *Optics and Lasers in Engineering*. 2008. Vol.46-3 p.257-271.
- Aben H. *Integrated photoelasticity*. London: Mc Graw-Hill, 1979. p. ISBN: 0-07-000043-3.
- Ainola L y Aben H. "Principal formulas of integrated photoelasticity in terms of characteristic parameters". *Journal of the Optical Society of America A*. 2005. Vol.22 p.1181-1186.
- Ainola L y Aben H. "Transformation equation in three-dimensional photoelasticity". *Journal of the Optical Society of America A*. 2006. Vol.23 p.741-746.
- Ainola L y Aben H. "Factorization of the polarization transformation matrix in integrated photoelasticity". *Journal of the Optical Society of America A*. 2007. Vol.24 p.3397-3402.
- Ainola L y Aben H. "On the generalized Wertheim law in integrated photoelasticity". *Journal of the Optical Society of America A*. 2008. Vol.25 p.1843-1849.
- Ainola L y Aben H. "Fringe patterns in integrated photoelasticity". *Journal of the Optical Society of America A*. 2009. Vol.26 p.1714-1720.
- International Organization for Standardization. *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. ISO/IEC 17025:2005. Ginebra: ISO, 2005.
- VAMAS TWA26. *Draft VAMAS TWA26 pre-standard: Calibration and assessment of optical strain measurements systems – Part I: Reference material for optical methods of strain measurement*. Sheffield: University of Sheffield, 2007.
- VAMAS TWA26. *Draft VAMAS TWA26 pre-standard Calibration and assessment of optical strain measurements systems – Part II: Standardised test materials for optical methods of strain measurement systems*. Sheffield: University of Sheffield, 2007.
- VAMAS TWA26. *Draft VAMAS TWA26 pre-standard Calibration and assessment of optical strain measurements systems – Part III: Good Practice Guide to (1) Geometric Moiré for in-plane displacement/strain analysis, (2) Grating (moiré) interferometry for in-plane displacement/strain analysis, (3) Image correlation for in-plane displacement/strain analysis, (4) Thermoelastic stress analysis, (5) Reflection photoelasticity, (6) Transmission photoelasticity, (7) Electronic Speckle pattern interferometry for displacement/strain analysis*. Sheffield: University of Sheffield, 2007.
- Vishay Measurements. *Tech Note 701-1: Calibration of photostress coatings*. Vishay Measurements Group Inc.: Raleigh, North Carolina, USA, 2003.
- Vishay Measurements. *Tech Note 706: Corrections to photoelastic coating fringe-order measurements*. Vishay Measurements Group Inc.: Raleigh, North Carolina, USA, 2005.
- International Organization for Standardization. *Guide to the expression of Uncertainty in Measurement*. ISO Guide 98-3:2008. Ginebra: ISO, 2008.
- International Organization for Standardization. *Propagation of distributions using a Monte Carlo method*. ISO Guide 98-3 / Supplement 1:2008. Ginebra: ISO, 2008.



# Las nuevas redes eléctricas inteligentes, su medida y gestión de la demanda



Carlos Madina-Doñabeitia  
Ibón Arechalde-Ugarteche

Ingeniero Industrial  
Ingeniero de Telecomunicación

TECNALIA. Unidad de Energía. Parque Tecnológico de Bizkaia, Ed.700.  
48160 Derio (Vizcaya). Tfno: +34 902 760 000. carlos.madina@tecnalia.com;  
ibon.arechalde@tecnalia.com

Recibido: 20/10/2010 • Aceptado: 14/03/2011

## New electric smartgrids, their metering and demand side management

### ABSTRACT

- Increasing electric energy demand and growing contribution from renewable energy sources to energy supply require a change in the operation of electricity networks. Electric grid must evolve from the traditional role of electricity carrier to becoming an infrastructure which not only allows the flux of electrons, but also the flux of information between the different participants in the electricity system, i.e., becoming a smart grid. In order to fully develop smart grids, household consumers' demand must be softened, so that its flexibility can be used for improving electric system stability. Nevertheless, residential consumers will not be able to manage their electricity demand, unless they can access the required infrastructure. This paper presents the characteristics of PRIME technology, both for allowing the required information exchange for smart grid evolution, and for giving household consumers access to demand side management services.
- Keywords:** smart meters, PLC communication, PRIME, active demand-side management, smartgrids.

### RESUMEN

La creciente demanda de energía eléctrica y la cada vez mayor contribución de las energías renovables al abastecimiento energético hacen necesario un cambio en la operación de las redes eléctricas. Las redes eléctricas deben evolucionar desde su tradicional característica de elemento conductor de la electricidad hasta convertirse en una infraestructura que no sólo permita el flujo de electrones, sino también el flujo de información entre los distintos participantes en el sistema eléctrico, convirtiéndose así en redes inteligentes (*Smartgrids*). Para conseguir el desarrollo completo de las redes inteligentes, es necesario flexibilizar la demanda de los clientes domésticos, a fin de aprovechar su potencial de contribución a la estabilidad del sistema eléctrico. Sin embargo, los consumidores residenciales no podrán gestionar su demanda si no disponen de la infraestructura necesaria. Este artículo presenta las características de la tecnología PRIME, entre las que destacan su capacidad para permitir el flujo de información necesario para la evolución hacia las redes inteligentes así como para la participación de los

clientes domésticos en servicios de gestión de la demanda.

**Palabras clave:** contadores inteligentes, comunicaciones PLC, PRIME, gestión activa de la demanda, redes inteligentes.

## 1. INTRODUCCIÓN

### *Redes inteligentes*

Hoy en día, no existe una definición estándar sobre qué son las redes inteligentes. Las distintas definiciones hacen referencias a aspectos tales como las tecnologías de la información, los flujos de energía bidireccionales, las fuentes de energía renovables o la gestión de la demanda.

Aún así, las distintas definiciones tienen en común el hecho de que las redes inteligentes se dedican a transportar tanto energía eléctrica, como información.

Por tanto, las redes eléctricas inteligentes aportan a los distintos actores (consumidores, generadores, operadores de los sistemas de transporte y distribución, etc.) una información, que les permite tomar mejores decisiones. Además,

facilitan la integración en el sistema eléctrico de los actores más pequeños y de los sistemas que emplean fuentes de energía de carácter intermitente. Así, las redes inteligentes permiten mejorar la competitividad, aumentar la seguridad del suministro y reducir el impacto medioambiental de los sistemas eléctricos. No obstante, aún no está claro cómo deben distribuirse sus costes de implantación, lo que se está convirtiendo en una de las mayores barreras a su desarrollo.

#### **Factores impulsores del cambio hacia redes inteligentes**

Si bien los sistemas eléctricos tradicionales funcionaban adecuadamente, a finales del siglo pasado tuvieron lugar una serie de hechos que hicieron necesario un cambio en el concepto del sistema eléctrico.

Por un lado, la construcción de una verdadera Unión Europea requería la creación de un mercado único de energía. Para ello, era necesario eliminar los monopolios nacionales y abrir a la competencia las actividades que fueran susceptibles de ello. Así, se liberalizaron las actividades de generación y suministro, manteniendo el transporte y la distribución como monopolios naturales. La liberalización de la generación permitió el libre albedrío en la construcción de nuevas centrales, tanto en cuanto a tecnología utilizada como en la ubicación de la misma.

Sin embargo, las experiencias negativas ocurridas en California durante el cambio de milenio y la necesidad de proteger a los consumidores más débiles frenaron el impulso liberalizador en el ámbito del suministro. Así, a pesar de que la liberalización para elegir suministrador en España fue más rápida de lo que las directivas comunitarias establecían, se mantuvieron las tarifas integrales como alternativa al suministro en competencia.

A pesar de que las tarifas integrales debían servir para facilitar la transición desde el modelo regulado al modelo

liberalizado, quedando únicamente como refugio a los consumidores más vulnerables en el largo plazo, el Gobierno decidió mantener los precios de dichas tarifas por debajo del coste de mercado, para lograr un doble objetivo. Por un lado, buscaba mejorar la competitividad de las empresas españolas y, por otro, mantener el nivel de consumo privado.

En efecto, en aquel tiempo, la economía española estaba viviendo una de sus mejores épocas, gracias al boom inmobiliario y al alto consumo interno debido al aumento del poder adquisitivo de las familias. Sin embargo, la globalización ponía en riesgo la competitividad de las empresas españolas frente a las empresas del este de Europa o Asia. A fin de mejorar la competitividad, el Gobierno mantuvo las tarifas integrales para las empresas en niveles bajos, para que sus costes operativos no aumentaran mucho. Del mismo modo, las tarifas integrales para los consumidores domésticos también se mantuvieron bajas, de manera que éstos tuvieran más renta disponible para dedicar al consumo y contribuir así a la bonanza económica del país.

Si bien el mantenimiento de las tarifas integrales en niveles bajos logró los objetivos buscados, creó una serie de problemas que deberían ser solucionados más adelante. En primer lugar, dado que las tarifas integrales estaban por debajo de coste, la competencia en el suministro prácticamente desapareció, al no poder los nuevos entrantes realizar ofertas mejores que las tarifas existentes. Por otra parte, se fue acumulando un déficit entre los ingresos de las actividades reguladas (incluido el suministro a tarifa) y los costes para realizarlas, el denominado déficit de tarifa, que todos los consumidores deberán pagar, con sus intereses, en los próximos años. Asimismo, el acceso a una electricidad a precios relativamente bajos hizo que los consumidores aumentaran en exceso su consumo eléctrico, de manera que el aumento interanual medio de la demanda eléctrica

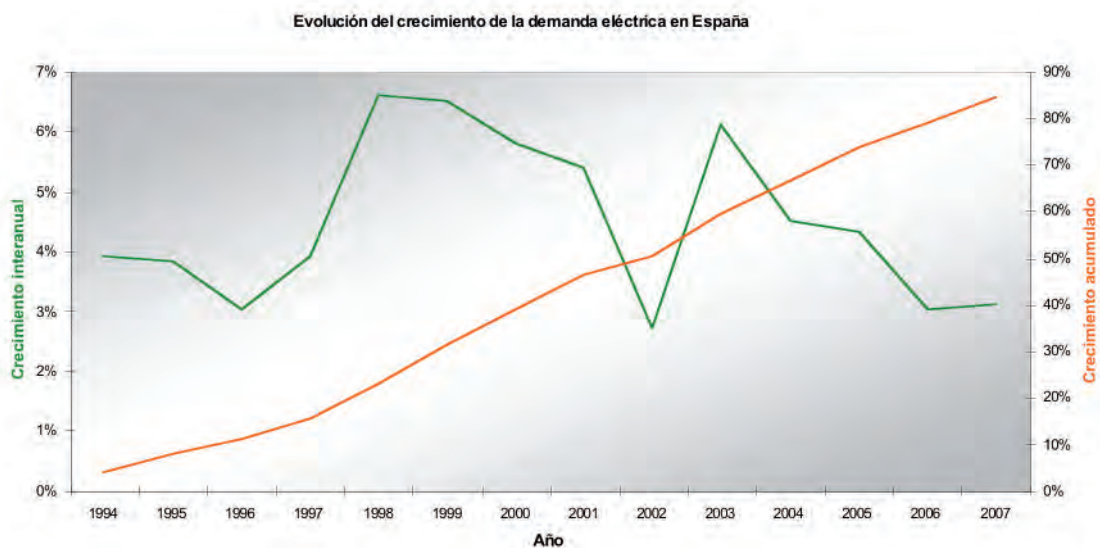


Fig. 1: Incrementos interanuales de la demanda eléctrica en España.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Red Eléctrica de España

entre 1994 y 2007 fue del 4,5%, llegando a crecimientos interanuales superiores al 6,5%.

Por otra parte, la cada vez mayor preocupación por la conservación del medio ambiente y los recursos naturales en los distintos gobiernos europeos y mundiales han favorecido el establecimiento de políticas de conservación de la energía y de fomento de las energías renovables. En España, estas políticas han desembocado en el establecimiento del régimen especial de generación eléctrica.

La adecuada retribución establecida en el régimen especial, ligada al aumento de la demanda y a la libertad para la instalación de nuevas unidades de generación, así como la existencia de buen recurso eólico y solar han provocado un importante despegue de las energías renovables en España.

Estos equipos se han ido conectando a la red sin llegar a integrarse por completo en la operación de la misma, a lo que hay que unir su carácter intermitente. La creciente penetración de los mismos está llevando a los operadores de los sistemas de transporte y distribución a exigir que las unidades de mayor tamaño cumplan una serie de requisitos técnicos y de comunicaciones, a fin de garantizar la seguridad y fiabilidad del suministro eléctrico. Además, el hecho de que el régimen especial se aplique únicamente a instalaciones de hasta 50 MW y el importante despegue de las energías renovables en España han hecho que el número de instalaciones a controlar por parte de los operadores del sistema se haya aumentado en varios órdenes de magnitud.

La necesidad de gestionar un gran número de instalaciones intermitentes de pequeño tamaño, junto con consumidores que pueden gestionar su demanda, en un entorno liberalizado

y con fuertes incrementos de la demanda eléctrica imponen grandes requisitos a la red eléctrica.

En este entorno, la solución puede derivar del refuerzo de la red (incluyendo las interconexiones con otros sistemas eléctricos) o de un mejor uso de las infraestructuras existentes (redes inteligentes). El refuerzo de las redes suele contar con problemas administrativos y burocráticos, y con la oposición local. Un claro ejemplo es la dificultad para la construcción de nuevas líneas de transporte en España y la escasa capacidad de intercambio con el resto de Europa.

Por su parte, la mejora en el uso de las infraestructuras existentes implica la necesidad de la gestionar adecuadamente la producción intermitente, de mejorar los sistemas de comunicaciones en la red de distribución, y de emplear dichos sistemas de forma apropiada para realizar una gestión activa de la demanda eléctrica. Todo esto supone un mayor esfuerzo operativo, pero también una reducción en la necesidad de nuevas inversiones y un mejor uso (y por lo tanto, amortización más rápida) de las mismas.

## 2. GESTIÓN DE LA PRODUCCIÓN INTERMITENTE

A principios de 1998, cuando se liberalizó el sistema eléctrico español, había alrededor de 1.200 instalaciones de régimen especial, con una potencia instalada de unos 5.400 MW y unas ventas cercanas a los 16.500 GWh en 1997. En esta situación, únicamente la cogeneración y la energía hidráulica de pequeño tamaño tenían una contribución significativa a la demanda, con un 7% y un 2% respectivamente, para una contribución total del 10% en el conjunto del régimen

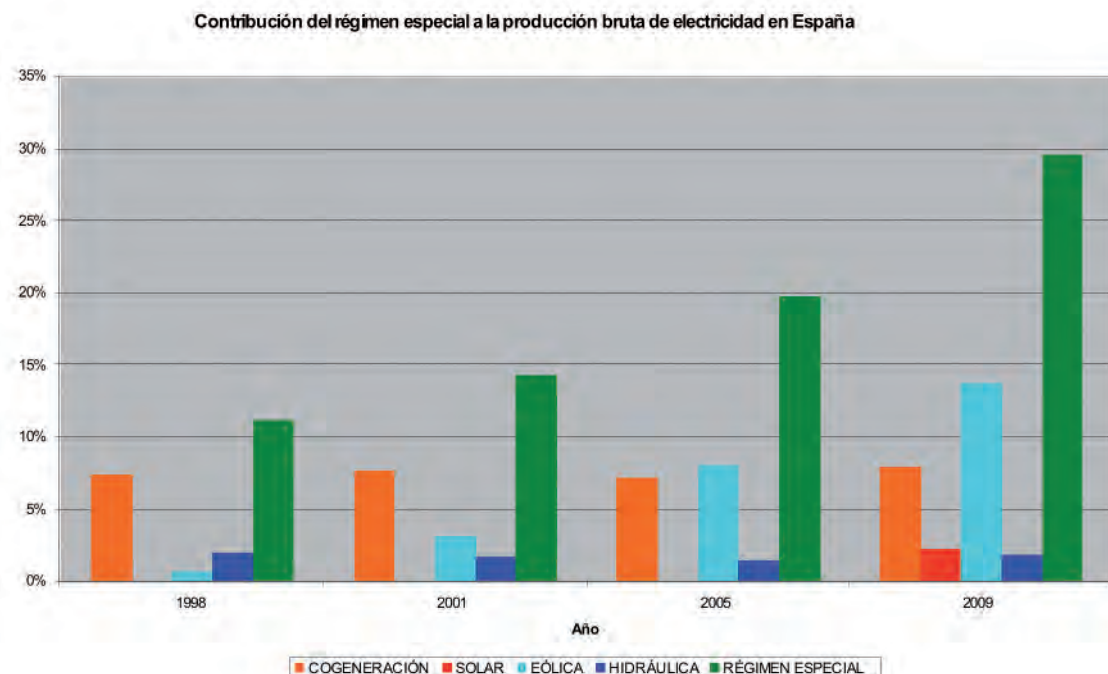


Fig. 2: Evolución de la contribución del régimen especial a la producción de electricidad en España (1998-2009)

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional de Energía



especial.

Aunque existía la opción de participar en el mercado de producción, hasta 2002 todas las instalaciones de régimen especial vendían su producción a la compañía distribuidora correspondiente y eran éstas las encargadas de gestionar su energía en el mercado. Así, la producción de régimen especial se consideraba una “demanda negativa”, ya que la distribuidora estimaba la cantidad de energía a comprar para sus clientes a tarifa integral y le restaba la producción de régimen especial estimada.

Doce años después, a finales de 2009, el número de instalaciones superaba las 55.000, la potencia se acercaba a los 32.000 MW y las ventas prácticamente alcanzaban los 79.000 GWh, lo que supone que, en este periodo, el número de instalaciones se ha multiplicado por 45, mientras que la potencia y las ventas se han multiplicado por 6 y por 5, respectivamente. Por lo tanto, el tamaño medio de las instalaciones se ha reducido considerablemente. Además, la contribución a la demanda prácticamente se ha mantenido para la cogeneración (8%) y la hidráulica de pequeño tamaño (2%), pero se ha disparado en el caso de la eólica (14%) y en el conjunto del régimen especial (30%).

Las ventajas que la producción de origen renovable aporta al sistema energético español y a la economía española en su conjunto hacen necesario el mantenimiento de los planes de estímulo de la misma. Así lo han expresado reiteradamente tanto los distintos gobiernos como el operador del sistema. Sin embargo, en este contexto, la producción en régimen especial no puede considerarse más una demanda negativa, sino que se debe tener un auténtico control sobre la misma

por parte de las distribuidoras y del operador del sistema.

Así, desde 2007, todas las instalaciones de régimen especial con una potencia instalada superior a los 10 MW tienen que estar adscritas a un centro de control. Desde estos centros de control, se puede obtener información acerca de la producción de cada una de las instalaciones controladas (producción en tiempo real, averías, paradas programadas...) y se pueden ejecutar órdenes remotas. Antes de la existencia de estos centros de control, en situaciones en las que un exceso de producción eólica en determinados nodos de la red de transporte podía poner en riesgo la estabilidad del sistema (en caso de falta en la línea o de un repentino aumento en la velocidad del viento que hiciera pararse a la mayoría de los aerogeneradores por motivos de seguridad), el operador del sistema no tenía forma de comunicarse con las instalaciones eólicas y pedirles que bajaran su producción. Por lo tanto, estaba obligado a programar otras centrales y desconectar la totalidad de la producción eólica. Gracias a los centros de control, el operador del sistema puede dar órdenes de reducción de producción a los parques eólicos y producir así la cantidad que garantiza la seguridad del suministro, y que esta producción se obtenga a partir de energías renovables. En concreto, el operador del sistema envía órdenes a los centros de control y son éstos quienes envían las órdenes particulares a cada instalación o a cada máquina dentro de cada instalación.

Por otra parte, como consecuencia del Real Decreto 661/2007, actualmente vigente, todas las instalaciones de régimen especial deben realizar ofertas al mercado de producción, independientemente de la opción de venta

## ESTADO DE LA TÉCNICA

Para hacer frente al desafío de las energías renovables, Red Eléctrica creó el CECRE (Centro de Control de Régimen Especial) en el año 2006; una iniciativa pionera a nivel mundial. El CECRE, primer centro del mundo donde se controla y gestiona la generación de los productores de energías renovables, principalmente eólicos, permite integrar en el sistema eléctrico la mayor cantidad de energía renovable posible manteniendo los niveles de calidad y garantizando la seguridad del suministro.



Fig. 3: Centro de Control de Régimen Especial de Red Eléctrica de España  
Fuente: Red Eléctrica de España

A través de 23 centros de control, que actúan como interlocutores, el CECRE recibe cada 12 segundos información en tiempo real de cada instalación (mayor de 10 MW) sobre el estado de la conexión a la red, la producción y la tensión en el punto de conexión. Esta información es procesada por sofisticadas herramientas que permiten comprobar si el total de la generación renovable puede integrarse de forma segura en cada instante en el sistema eléctrico y enviar las correspondientes órdenes de actuación en caso necesario.

elegida, y afrontar la liquidación de los desvíos en los que hayan incurrido. Dado que para hacer ofertas al mercado hay que ser agente de mercado, lo que puede suponer un coste financiero alto para las instalaciones más pequeñas, se estableció un representante de último recurso, así como su retribución. De esta manera, las instalaciones de régimen especial (o su representante) están obligadas a realizar previsiones de producción y tienen el incentivo adecuado (liquidación de desvíos) para intentar optimizarlas, por lo que se consigue una integración mejor en el sistema.

De acuerdo al Plan de Acción Nacional de Energías Renovables 2011-2020, las energías renovables aportarán el 22,7% del consumo final bruto de energía en 2020 y contribuirán al 40% de la generación bruta de electricidad en ese mismo año. Por lo tanto, serán necesarias medidas adicionales que permitan una mejor integración de las energías renovables en el sistema. Estas medidas incluyen actuaciones físicas (aumento de las interconexiones internacionales) y legales (mayores exigencias a las instalaciones de régimen especial), pero también de mejora de la operativa y de los flujos de información (redes inteligentes). En otras palabras, hasta ahora, se ha dotado de inteligencia a la parte de generación, pero para poder integrar toda la producción renovable prevista en el nuevo plan de energías renovables, será necesario dotar de inteligencia también al consumo.

### 3. SISTEMAS DE COMUNICACIÓN EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN

Dado que la inteligencia se consigue mediante la provisión, no solo de energía eléctrica, sino también de información, es absolutamente necesario el diseño de un buen sistema de comunicaciones.

Ante esta necesidad de comunicaciones algunas empresas eléctricas han optado por sistemas inalámbricos (GPRS, GSM...) y otras han optado por nuevas tecnologías que permitan transmitir datos por la propia red eléctrica (*Power Line Communications*, también llamada PLC). La opción PLC supone un cambio de concepto. Hasta ahora, sólo se denominaban redes de telecomunicaciones a las redes suministradas por operadoras de telecomunicaciones. A partir de ahora, la red eléctrica pasa a ser una red de telecomunicaciones. Esto implica:

- reducción de costes: no se necesita un proveedor de comunicaciones inalámbricas
- control de las comunicaciones: la empresa eléctrica será, en muchos casos, dueña de la red
- desarrollo de la solución: especificaciones, normas, productos...

Las grandes empresas eléctricas, con mayor capacidad de inversión, se han decantado por esta opción. En España, coexisten en la actualidad dos tecnologías: la *Meters and More* promocionada por ENEL, Endesa y Viesgo, y la PRIME promocionada por Iberdrola, Gas Natural Fenosa, HC Energía, EDP y otras operadoras europeas. Esta última, por involucrar a mayor número de agentes y por ser una

solución abierta, está en el foco de atención de compañías de muchos países.

Aunque las tecnologías PLC pueden aplicarse a diferentes equipos que conforman la red, el primer despliegue se ha iniciado en 2010 con los elementos que más información proporcionan en toda la red eléctrica: los contadores.

Los nuevos contadores electrónicos van a suponer una revolución en la gestión de la demanda porque, frente a los antiguos contadores que se limitaban a medir el consumo en un sentido, con estos contadores se podrá:

- medir tanto consumo como generación (energía fluyendo en ambos sentidos)
- medir tanto potencia activa como reactiva
- acumular datos en el contador en periodos de tiempo muy pequeños, que permitan analizar los hábitos de consumo de los usuarios
- solicitar datos (instantáneos o periódicos) del contador desde los centros de control, sin necesidad de desplazar a un operario, y
- gestionar eventos y alarmas que genere o detecte el propio contador.

En el centro de control, un concentrador con la misma tecnología recogerá los datos de cientos (incluso miles) de contadores, realizando un tratamiento selectivo de la información. Así mismo, el concentrador controlará que todos los contadores estén conectados en todo momento, que no se produzcan sobrecargas en la red, que se gestionen adecuadamente los eventos que le lleguen desde los distintos contadores, que se puedan cambiar las tarifas del contador de manera remota e incluso que se puede reprogramar remotamente el contador si éste no funciona.

La tecnología PRIME establece las especificaciones de la comunicación en la capa física y capa de enlace (niveles OSI), pero deja relativamente abierto el nivel de aplicación. En España, las mismas compañías que se involucraron en PRIME van a utilizar el lenguaje DLMS/COSEM para el nivel de aplicación. Todos los contadores instalados por esas compañías guardarán, por tanto, los mismos datos siguiendo la misma estructura. Esto implicará incluso la compatibilidad entre equipos de distintas compañías eléctricas (excepto Endesa y Viesgo).

El cambio es importante y el riesgo es alto. Y como en todo sistema de comunicaciones, lo más difícil es asegurar la compatibilidad e interoperabilidad entre los equipos de diferentes fabricantes. Sólo un proceso de certificación exigente asegura el cumplimiento de las especificaciones de los equipos. Así, por ejemplo, la PRIME Alliance solo acepta equipos certificados por los laboratorios con los que tiene un convenio de colaboración, actualmente Tecnia y KEMA.

El proceso de certificación sigue los siguientes pasos:

- 1º - Certificación de las capas física y de enlace (esta certificación puede realizarse tanto a contadores con chip integrado como a chips que van a integrarse en los contadores)
- 2º - Certificación de capa de convergencia (pasarela entre PRIME y DLMS/COSEM) en contadores

- 3º- Certificación del cumplimiento de las especificaciones DLMS/COSEM en contadores
- 4º- Certificación del cumplimiento de las normas EN 50065-1, EN 50065-2-3 y EN 50065-7 (normas de compatibilidad electromagnética), tanto a contadores como a chips que van a integrarse en los contadores.

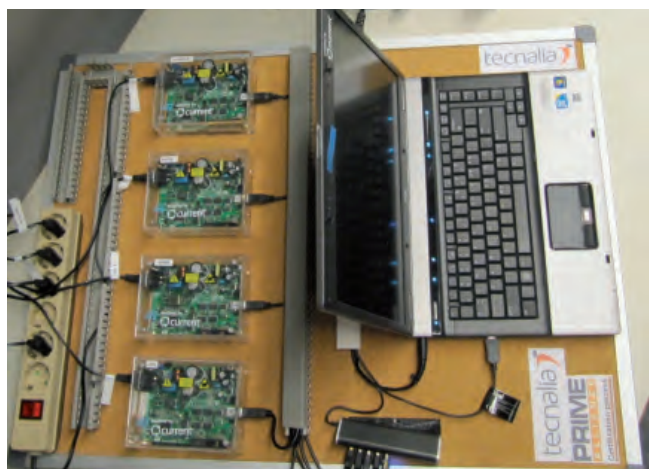


Fig. 4: Proceso de certificación de contadores PRIME  
Fuente: Tecnalia.

Una vez finalizado este proceso, las compañías eléctricas inician sus pruebas de campo, colocando contadores en instalaciones piloto en las que pueden hacer un seguimiento exhaustivo de los equipos.

Al ir instalando nuevos equipos a los usuarios los concentradores de PRIME van adaptando la topología de la red de comunicaciones en función de las necesidades. A veces lo harán cediendo contadores a otros concentradores; otras veces solicitando a algunos contadores que sirvan de puente para otros más alejados. Todo esto será invisible para el usuario, pero permitirá superar la rigidez de la red eléctrica conocida hasta ahora.

Dentro de la tecnología PRIME, y para aquellos equipos que incluyan el nivel de aplicación DLMS/COSEM, se definen cuatro perfiles de acceso a los equipos:

- Perfil de "sólo lectura", permite leer los datos del contador con la periodicidad que se desee, así como la detección de alarmas, por lo que las compañías distribuidoras lo emplearán para la facturación y la gestión de averías.
- Perfil de gestión, permite actuar sobre el contador a fin de modificar la discriminación horaria o el límite de la potencia contratada, restaurar las alarmas, etc.
- Perfil de reprogramación, permite actualizar, de manera remota, el firmware del equipo para renovar sus funcionalidades.
- Perfil público, disponible para terceras partes (en principio, comercializadores) que da acceso a la lectura de un número reducido de datos.

Los tres primeros permitirán a las compañías eléctricas aplicar las funcionalidades detalladas previamente. La cuarta

permitirá al usuario, a medio plazo, disponer de información precisa sobre sus hábitos de consumo.

## 4. GESTIÓN ACTIVA DE LA DEMANDA

Desde mediados de la última década del siglo pasado y hasta la actual crisis económica, los incrementos de demanda en el sistema eléctrico peninsular español han sido espectaculares. Así, en la década entre 1993 y 2008, la demanda eléctrica casi se duplicó (ver Fig. 1). Incluso a pesar de la actual crisis económica, que supuso que en 2009 la demanda eléctrica se redujera, por primera vez desde 1993, las potencias horarias máximas de verano e invierno han seguido creciendo, siendo en la mayoría de los casos superiores a los aumentos totales de demanda.

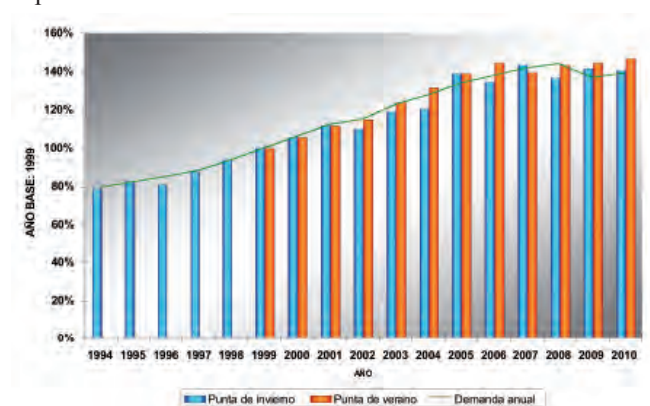


Fig. 5: Incrementos de demanda en el sistema eléctrico peninsular  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Red Eléctrica de España

Por lo tanto, si se mantiene la tendencia actual, la demanda de energía eléctrica continuará creciendo en los próximos años y las puntas estacionales crecerán aún más. Si, además, se pretende fomentar la implantación del vehículo eléctrico, deberán desarrollarse sistemas de carga inteligente de los vehículos, pero también será necesario tomar medidas para consumir la energía de manera más racional.

Hasta ahora, las actuaciones principales en lo que respecta a la gestión activa de la demanda han sido dos: los contratos de interrumpibilidad para los grandes clientes y las tarifas con discriminación horaria para el resto.

Mientras existían tarifas para los clientes en alta tensión, existían las tarifas de interrumpibilidad, accesibles únicamente a los grandes clientes industriales. De acuerdo a estas tarifas, los clientes recibían la electricidad a precios realmente bajos, a cambio de que, ante una situación de emergencia, el operador del sistema pudiera desconectarlos para restablecer la seguridad del sistema. Al desaparecer las tarifas integrales para los consumidores en alta tensión, y dado que la gestión de la demanda de los grandes consumidores de energía es una herramienta muy útil para el operador del sistema, se estableció un sistema para contratar el servicio de gestión de la demanda en el mercado. Existen unos contratos estándar,



Tipo	Preaviso mínimo	Duración total máxima	Número máximo de periodos por orden	Duración máxima por periodo
1	2 horas	12 horas	3	4 horas
2	2 horas	8 horas	2	4 horas
3	1 hora	3 horas	1	3 horas
4	5 minutos	2 horas	1	2 horas
5	0 minutos	1 hora	1	1 hora

Fig. 6: Tipos de reducción de potencia en el servicio de gestión de la demanda en el mercado

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Orden ITC/2370/2007, de 26 de julio, por la que se regula el servicio de gestión de la demanda de interrumpibilidad para los consumidores que adquieren su energía en el mercado de producción

en los que están claramente definidas las condiciones para participar, los tipos de reducciones de potencia que se pueden contratar y la retribución de las mismas. Únicamente los consumidores que sean capaces de reducir un mínimo de 5 MW en todos y cada uno de los periodos tarifarios pueden contratar este servicio con el operador del sistema.

En cuanto a la discriminación horaria, los comercializadores en el mercado libre deben satisfacer las tarifas de acceso a las redes por los consumos de sus clientes, por lo que, normalmente, los precios que ofrecen a sus clientes tienen, al menos, el mismo número de periodos que la tarifa de acceso que les corresponde. Las tarifas de acceso para los clientes con potencias contratadas superiores a 15 kW tienen, al menos, tres periodos tarifarios, pudiendo llegar a seis periodos en el caso de clientes conectados en alta tensión, en función de la tensión de conexión y la potencia contratada. Los clientes con potencias de 15 kW, tanto los que compran a través de la TUR como a los que se les aplican las tarifas de acceso, pueden solicitar discriminación horaria de dos periodos, de los cuales la punta es de 11 a 21 horas en invierno y de 12 a 22 horas en verano.

Los consumidores industriales, así como los comerciales de mediano y gran tamaño, ya disponían de equipos capaces de medir sus consumos eléctricos cada hora, por lo que podían acceder a suministros eléctricos en los que el precio fuera variable a lo largo del día, incluso con más periodos de los establecidos en las tarifas de acceso. Sin embargo, los consumidores domésticos y los consumidores comerciales de pequeño tamaño únicamente podían acceder a la tarifa nocturna como forma de ahorrar dinero si podían gestionar su demanda.

Para permitir el acceso de estos consumidores a nuevas fórmulas de gestión de la demanda, desde finales de 2007, todos los nuevos contadores deben ser capaces de medir el consumo de cada hora. Además, se estableció un plan de sustitución de contadores, en el que se establecen varios hitos intermedios, a fin de que todos los contadores hayan sido sustituidos antes del fin de 2018.

No obstante, conviene recordar que la sustitución de contadores por sí sola no supondrá la participación de los consumidores en la gestión de la demanda. Por una parte, es necesario que los contadores que se instalen incorporen cierta capacidad de control e inteligencia, lo que se consigue mediante soluciones como PRIME, Meters and More y G3 (liderada por EDF).

Por otra parte, es muy importante la estandarización de las funcionalidades de los distintos contadores instalados por las diferentes empresas distribuidoras, de manera que un mismo comercializador pueda ofrecer las mismas opciones a dos clientes que tengan contadores con tecnologías diferentes, incluso en países diferentes. Para ello, se están realizando diferentes procesos de estandarización, cada uno con sus propias dificultades y, por tanto, ritmos. Así, y debido a sus similitudes conceptuales, Iberdrola y EDF están profundizando en la homogeneización entre PRIME y G3, mientras que ambas empresas participan en el proyecto OPEN meter junto con Enel, Endesa y RWE, entre otros, para el establecimiento de un estándar de mayor amplitud geográfica.

Por último, es imprescindible que los comercializadores colaboren con los consumidores en la gestión de la demanda. Diversos estudios muestran que, si bien una correcta información a los clientes permite mejorar sus patrones de consumo, éstos mejoran aún más si la información va acompañada de señales de precios. Así, existen cinco niveles principales de interacción entre ambos:

1. Nivel 1 – Programas de ahorro y eficiencia energética: Consiste en la mejora del rendimiento de los equipos eléctricos, mejora de los aislamientos térmicos, etc. a fin de reducir el consumo eléctrico en general.
2. Nivel 2 – Programas de control indirecto de cargas mediante tarificación: En este caso, el precio que los consumidores pagan por la electricidad varía a lo largo del día. Existen tres tipos principales:
  - a. Tarifas con discriminación horaria: en cada caso, se definen de antemano los periodos de aplicación de cada precio y el valor de dicho precio.
  - b. Precios en tiempo real: el consumidor paga el precio establecido en el mercado de producción para cada hora. El comercializador puede referenciar el precio a pagar por el consumidor al mercado diario (que se conoce el día anterior), a la última sesión del mercado intradiario (que se conoce varias horas antes) o al precio final que el propio comercializador debe pagar (que se conoce con posterioridad al momento de consumo).
  - c. Precios de momento crítico: en los momentos en los que el precio de mercado es especialmente elevado por excesiva demanda o por falta de producción, el comercializador eleva el precio a cobrar al cliente

para que éste reduzca su consumo y contribuya así a la reducción del pico del sistema. En este caso, el consumidor recibe la notificación del precio con relativa poca antelación, por lo que su respuesta debe ser rápida.

3. Nivel 3 – Programas de control indirecto de cargas mediante contratos o incentivos: En estos programas se establecen contratos estándar entre el consumidor y el comercializador u otra tercera parte, normalmente el operador del sistema, como en el caso de los contratos del servicio de gestión de la demanda en el mercado descritos anteriormente. El precio que el consumidor paga por la electricidad no varía, pero reciben un incentivo económico si reducen su carga en los momentos en los que se lo requiere la contraparte.

4. Nivel 4 – Programas de control directo de carga: Estos programas pueden ser similares a los de Nivel 3, pero, en este caso, se realiza un control directo, es decir, es el propio comercializador (o el operador del sistema, en su caso) quien desconecta las cargas del consumidor directamente, y sin que éste actúe en ningún momento. Aunque en Europa no son comunes, sí tienen más de 20 años de historia en los Estados Unidos.

5. Nivel 5 – Programas de mercados de gestión de la demanda: el objetivo de estos programas es que el consumidor ofrezca su capacidad de reducir carga en el mercado, en lugar de hacerlo mediante contratos estándar. En los programas de Nivel 5, si bien las condiciones de participación sí son iguales para todos los participantes, tanto la cantidad de energía a reducir, como el precio pueden variar de una hora a otra e, incluso, de un participante a otro.

## 5. CONCLUSIONES

Las redes inteligentes permiten aumentar la contribución de la gestión de la demanda y de las energías renovables al suministro eléctrico, lo que redundará en una reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero, en una menor dependencia energética nacional y en una electricidad más barata (en 2010, especialmente durante el primer cuatrimestre, el precio del mercado diario ha sido cero en más de 300 horas, gracias a la alta contribución de la energía hidráulica y la energía eólica). Los objetivos en energías renovables para los próximos años son ambiciosos y requieren de un importante esfuerzo tanto en infraestructuras eléctricas, como en desarrollos legales y normativos, pero también exigen la mejora de la operativa y de los flujos de información para lograr disponer de unas redes eléctricas inteligentes.

Hasta ahora, se ha dotado a las redes eléctricas de inteligencia para gestionar la producción, especialmente la de carácter intermitente. Sin embargo, será necesario dotar también de inteligencia al consumo para poder alcanzar los importantes desafíos energéticos a los que nos enfrentamos. En este sentido, el despliegue de los contadores inteligentes se antoja poco menos que indispensable.

Las tecnologías de comunicación basadas en PLC acaban de nacer, pero el conjunto concentrador-contador ofrece ya una enorme cantidad de información que, en teoría, debe beneficiar tanto a las compañías eléctricas como usuarios. Gracias a estas nuevas tecnologías, los consumidores pueden saber su consumo cada 5 minutos, disponer de diferentes tarifas con discriminación horaria o disponer de servicios avanzados para gestionar las cargas eléctricas de su hogar (seguimiento y control de las cargas a través del móvil o Internet, apagado automático de ciertas cargas al abandonar el hogar...). No obstante, la existencia de diversas soluciones tecnológicas exige un importante esfuerzo de coordinación, aún en curso, para evitar problemas de incompatibilidades entre contadores basados en distintas soluciones.

Aún así, el despliegue de la tecnología debe ir acompañado de nuevas prácticas en la comercialización de la energía. La tecnología permitirá mejorar la operación de las redes, pero únicamente la verdadera implicación de los consumidores conseguirá optimizar el funcionamiento del sistema. Para ello, el consumidor no sólo debe ser consciente de su consumo energético, sino que, además, debe ser capaz de obtener un rendimiento económico razonable por realizar un consumo más responsable y beneficioso para el sistema.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Comisión Nacional de Energía. *Información Estadística sobre las Ventas de Energía del Régimen Especial*. Ediciones 2006-2010. Mensual. Disponible en Internet: < [http://www.cne.es/cne/Publicaciones?id\\_nodo=143&accion=1&ts\\_oloUltimo=si&tsIdCat=10&keyword=&auditoria=F](http://www.cne.es/cne/Publicaciones?id_nodo=143&accion=1&ts_oloUltimo=si&tsIdCat=10&keyword=&auditoria=F) > [consulta: 19 de octubre de 2010].
- Comunidad de Madrid. Consejería de Economía e Innovación Tecnológica. Dirección General de Industria, Energía y Minas. *Guía Básica de la Gestión de la Demanda Eléctrica*. Madrid. 2007. 64p. Depósito Legal: M-21119-2007.
- España. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. *Plan de Acción Nacional de Energías Renovables de España (PANER) 2011-2020* [en línea]. 30 junio 2010 [ref. de 19 de octubre de 2010]. Disponible en Internet: < [http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos\\_20100630\\_PANER\\_Espana\\_version\\_final\\_11\\_cdb842de.pdf](http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_20100630_PANER_Espana_version_final_11_cdb842de.pdf) >.
- España. Real Decreto 1164/2001, de 26 de octubre, por el que se establecen tarifas de acceso a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica. *Boletín Oficial del Estado*, 8 de noviembre de 2001, núm.268, p.40618
- España. Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. *Boletín Oficial del Estado*, 26 de mayo de 2007, núm.126, p.22846.
- España. Orden ITC/2370/2007, de 26 de julio, por la que se regula el servicio de gestión de la demanda de interrumpibilidad para los consumidores que adquieren su energía en el mercado de producción. *Boletín Oficial del Estado*, 3 de agosto de 2007, núm.185, p.33442.
- España. Orden ITC/3860/2007, de 28 de diciembre, por la que se revisan las tarifas eléctricas a partir del 1 de enero de 2008. *Boletín Oficial del Estado*, 29 diciembre 2007, núm.312, p.53781.
- Harris J L. "Achieving Energy Efficiency Through Informed End-Users". *Metering International*. Vol.2010-1, p.61-62
- Red Eléctrica de España. *El sistema eléctrico español* [en línea]. Ediciones 1995-2009. Anual. Disponible en Internet: < [http://www.ree.es/sistema\\_electrico/informeSEE.asp](http://www.ree.es/sistema_electrico/informeSEE.asp) > [consulta: 19 de octubre de 2010].
- *Iberdrola and ERDF to work together towards a common interoperable PLC open telecommunications standard for smart metering* [en línea]. Metering.com. Nota de prensa, 8 de octubre de 2010, [ref. de 19 de octubre de 2010]. Disponible en Internet: < [http://www.metering.com/iberdrola/ERDF/common\\_interoperable/PLC/open/telecommunications/standard/smart/metering](http://www.metering.com/iberdrola/ERDF/common_interoperable/PLC/open/telecommunications/standard/smart/metering) >
- *Proyecto OPEN meter*, [ref. de 19 de octubre de 2010]. Disponible en Internet: < <http://www.openmeter.com/> >

# Controlador Neuro-Robusto para sistemas no lineales



Iván Machán-González \*  
Hilario López-García\*  
José Luis Calvo-Rolle \*\*

Doctor Ingeniero Industrial  
Doctor Ingeniero Industrial  
Doctor Ingeniero Industrial

\* Universidad de Oviedo. Dpto. de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Campus de Viesques, Edificio 2 – 33204 Gijón (Asturias). Tfno: +34 985 182532. machonivan@uniovi.es; hilario@uniovi.es

\*\* Universidad de A Coruña. Dpto. de Ingeniería Industrial. Escuela Politécnica de Ferrol. Avda. 19 Febrero, s/n – 15403 Ferrol (A Coruña). Tfno: +34 981337400. jcalvo@cdf.udc.es

Recibido: 04/10/2010 • Aceptado: 14/03/2011

## Neuro-robust controller for non-linear systems

### ABSTRACT

- This work shows a new method to obtain the tuning parameters of a controller based on PID topology in standard format in order to lead the controlled system to a stable state. This technique is based on the well known Gain Scheduling method. Firstly, the system is identified for each key operating point obtaining the corresponding transfer functions by means of least squares techniques. Then the stability structures are calculated using the transfer functions aiming to train an artificial neural network which prevents the system from becoming unstable. Finally, the proposed method is experimentally verified on a laboratory plant.
- **Keywords:** neural networks, robust control, PID, non-linear systems.

### RESUMEN

Este trabajo muestra un nuevo método para obtener los parámetros de ajuste de un regulador basado en el controlador tipo PID en su formato estándar, con el objetivo de situar la planta que se pretende controlar en una región de funcionamiento estable. Esta técnica subyace en el conocido método *Gain Scheduling*. En primer lugar el sistema es identificado para cada punto de operación significativo obteniendo las funciones de transferencia correspondientes mediante mínimos cuadrados. Después, empleando las funciones de transferencia, se hallan las estructuras de estabilidad con el objetivo de programar una red neuronal artificial, cuyo fin es prevenir que el sistema pase a ser inestable. El método propuesto es verificado experimentalmente sobre una planta de laboratorio.

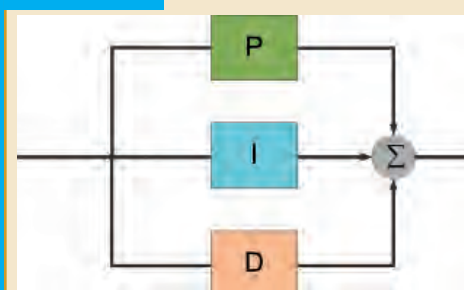
**Palabras clave:** redes neuronales, control robusto, PID, sistemas no lineales.

### 1. INTRODUCCIÓN

En el campo de la ingeniería de control de procesos es necesario trabajar constantemente, con el fin de obtener nuevos métodos de regulación para

mejorar las topologías vigentes [1-3]. Esta demanda de aplicaciones en control es debida, entre otras, a la gran cantidad de posibilidades que están siendo empleadas a día de hoy.

A pesar del ritmo frenético de avances y descubrimientos de diferentes alternativas de regulación y control, ha sido imposible hasta el momento desbancar técnicas populares como el “tradicional” regulador PID. Desde el desarrollo de este controlador por Nicholas Minorsky [4, 5] en el año 1922, numerosos estudios han sido realizados sobre él.



#### Regulador PID

El PID es el regulador más universal de la teoría de control. Proporciona una señal de actuación que opera sobre la planta a controlar, correspondiente a la suma de acciones del error de tipo: proporcional, integral y derivativa.



Existen numerosas técnicas de control de procesos en cualquier campo, donde se han introducido innovaciones, como puede ser la inteligencia artificial [6]. Pese a ello, la inmensa mayoría de los lazos de control implementados emplea controladores de tipo PID, elevando el porcentaje de utilización entorno a un 90% [7]. El regulador PID tradicional se sigue empleando masivamente debido a razones de diversa índole como son: robustez, fiabilidad, simplicidad, tolerancia a fallos, etc. [8].

Las fórmulas desarrolladas para extraer los términos, que en ocasiones son empíricas, siempre están orientadas a optimizar una determinada especificación. Se ha de tener en cuenta que a menudo, cuando los parámetros se han obtenido para mejorar una característica concreta, ocurre que dicha mejora será en detrimento de otra. En el procedimiento habitual de ajuste de un controlador, tras la medición de características de la respuesta, será necesario proceder a la obtención de los parámetros mediante las expresiones, y seguidamente proceder a un ajuste fino mediante técnicas de prueba-error.

En control de procesos, a pesar de que se disponga de un sistema con un carácter no lineal, es usual que se requiera que ciertas especificaciones sean iguales en los diferentes puntos de operación en los que se trabaja. Si se opera con reguladores tipo PID, será necesario disponer de valores de parámetros de ajuste diferentes en cada una de las zonas de funcionamiento. Este aspecto puede ser solucionado con el uso de controladores PID de tipo adaptativo, y en algún caso predictivo [9-12]. En su implementación a menudo el operador se encuentra con soluciones costosas e íntimamente ligadas con el tipo de proceso que se pretende regular, y además suele ser complejo establecer una teoría genérica para ese tipo de controladores.

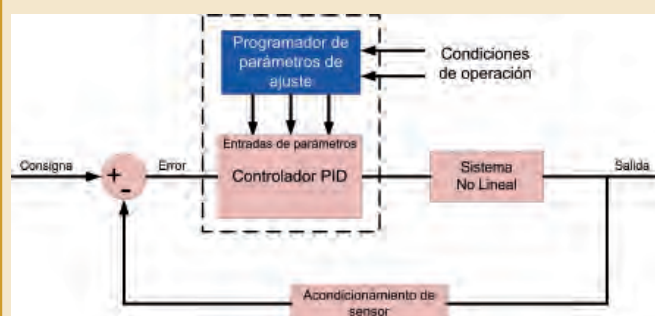
Algunos de los inconvenientes que conlleva el uso de controladores adaptativos convencionales en ocasiones pueden ser paliados exitosamente con el uso de controladores PID basados en la técnica de *Gain Scheduling*. Esta metodología es relativamente sencilla de implementar y normalmente se obtienen resultados altamente satisfactorios.

El concepto de *Gain Scheduling* aparece a comienzos de los años 90 [13], y se encuentra incluida por algunos investigadores en la familia de los controladores adaptativos [9].

Para poder llevar a cabo la implementación de la técnica de *Gain Scheduling* es necesario poder seleccionar variables significativas del sistema que permitan definir el punto de operación en el que se esté trabajando. A continuación es necesario dividir todo el rango de operación de la planta en zonas donde el comportamiento pueda ser considerado lineal. Seguidamente se obtendrán los parámetros de ajuste del controlador que permitan disponer de especificaciones similares a lo largo de todo el rango de operación de la planta.

Aunque no existe un procedimiento sistemático para las tareas mencionadas, a menudo el primer paso de selección de variables consiste en tomar aquellas que pueden ser medidas de forma sencilla. El segundo paso suele ser mucho más complicado, pues no es tarea sencilla establecer las fronteras de los rangos de operación, y en ocasiones para un mismo sistema unos rangos no tienen absolutamente nada que ver con los otros. Si lo que se hace es seleccionar puntos concretos de operación en lugar de buscar rangos lineales, ocurre que el sistema puede ser estable en ellos para los parámetros hallados, pero no tiene por que serlo entre los puntos seleccionados para esos valores. Es un reto dentro de esta técnica, y por tanto carece de una solución simple, y cuando esta existe, está usualmente particularizada: es por ello que ha sido y sigue siendo motivo de estudio por investigadores [14-16].

A menudo los operadores humanos de planta que se encuentran al cargo, pese a que la técnica de *Gain Scheduling* selecciona los parámetros adecuados, poseen los privilegios para poder modificarlos con el objetivo de mejorar las especificaciones de la planta. Debido a este hecho la combinación de parámetros asignados por el operador pueden llevar a la planta a un estado de inestabilidad no deseado. El método propuesto trata de prevenir que el sistema se vuelva inestable pese a la asignación de valores a parámetros que lo provocarían.



### Gain Scheduling

El método de "Gain Scheduling" en teoría de control es utilizado para el control de sistemas no lineales. Los resultados alcanzados con él son altamente satisfactorios en muchos casos, pese a estar basados en controladores de tipo lineal.



### Red neuronal artificial

Las Redes Neuronales Artificiales son una gran área de la Inteligencia Artificial que consiste en una máquina con elementos neuronales de procesamiento paralelo, de tal forma que el comportamiento global emule de la forma más fiel posible a los sistemas neuronales animales.

El camino que se plantea para solucionar el problema está basado en el empleo de redes neuronales artificiales. Con la ayuda de las redes neuronales artificiales, en esencia, el método identifica si los parámetros programados en tiempo real por el operador humano llevarían la planta a la inestabilidad, y, si ese es el caso, no lo permite y son reemplazados por una combinación que aseguraría la estabilidad para ese punto de operación concreto en el que se encuentre trabajando.

El documento se estructura comenzando con la descripción de la topología de regulador empleada en el experimento, seguidamente se hace una descripción de la implementación sobre una planta experimental de laboratorio de tipo no lineal sobre la que se realizan las pruebas de la técnica propuesta, finalmente se redactan las conclusiones.

## 2. CONTROLADOR PID

Existen múltiples formas para representar el controlador PID, pero sin embargo la expresión más común es la indicada en la Ecuación 1.

$$u(t) = K \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

Donde 'u' es la variable de control y 'e' es el error resultante de 'e=Y<sub>sp</sub>-y' (diferencia entre la referencia dispuesta a la entrada y la salida medida del proceso). Así, la variable de control es la suma de tres términos: el término P, el cual es proporcional al error, el término I, que es proporcional a la integral del error, y el término D, que es proporcional a la derivada del error. Los parámetros de ajuste del controlador son: la ganancia proporcional K, el tiempo integral T<sub>i</sub> y el tiempo derivativo T<sub>d</sub>.

La representación en diagrama de bloques del controlador PID de la expresión anterior (comúnmente conocido como formato estándar) [7, 8], se tiene en la Figura 1.

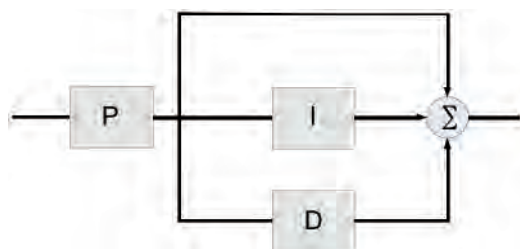


Fig. 1: Controlador PID en formato estándar

Existen multitud de procesos en la industria cuyo funcionamiento no es adecuado para determinadas aplicaciones. Este problema es a menudo resuelto empleando controladores PID con los cuales se obtienen ciertas especificaciones óptimas para el proceso que se esté

intentando controlar. El ajuste de este controlador es realizado mediante la variación de los términos correspondientes mencionados anteriormente.

## 3. TOPOLOGÍA PROPUESTA DE CONTROLADOR

La dinámica del sistema cambia con las condiciones de operación del proceso. Estas variaciones pueden ser debidas, por ejemplo, a las bien conocidas no linealidades inherentes del sistema. Es posible modificar los parámetros de control, mediante la monitorización de las condiciones de operación de la planta y el posterior establecimiento de reglas para seleccionar la combinación adecuada. La metodología de partida consistirá en primera instancia en la aplicación del método de *Gain Scheduling*, para lo cual es necesario en primer lugar analizar el comportamiento en puntos significativos de interés y, a continuación, establecer reglas para programar las ganancias adecuadas en el controlador. De esta forma, será posible mantener determinadas especificaciones relativamente constantes a lo largo de todo el rango de operación de la planta. La base de conocimiento de reglas programada deduce los parámetros de ajuste del controlador una vez que se conocen las condiciones de operación. El método de *Gain Scheduling* puede ser considerado como un tipo de realimentación no lineal de un tipo especial. Posee un controlador lineal cuyos parámetros son seleccionados dependiendo de las condiciones de operación, cuyas reglas son extraídas y programadas. La idea es relativamente simple, pero su implementación no es sencilla de llevar a cabo en sistemas de control no basados en computador.

A pesar de que se implemente el *Gain Scheduling*, se plantea en este trabajo ofrecer la posibilidad al operador humano de modificar los parámetros de ajuste del controlador con el fin de mejorar la operación del proceso. Esta idea se representa de forma esquemática en la Figura 2.

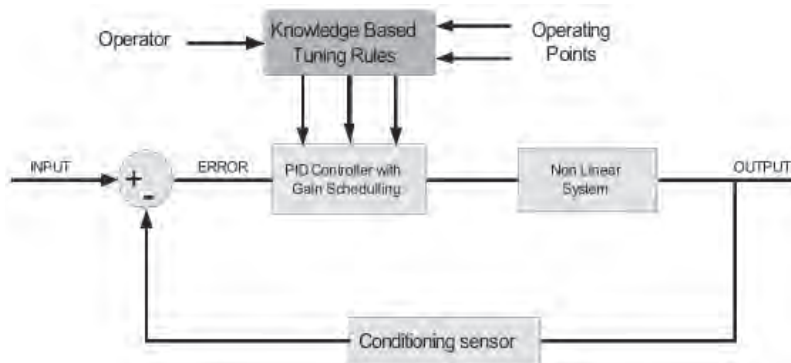


Fig. 2: Topología tradicional de Gain Scheduling modificada

La propuesta que se presenta dispone por tanto de nuevas entradas correspondientes a parámetros del controlador programados por el operador de forma manual, que serán sustituidos por los que la base de conocimiento de *Gain*

*Scheduling* programaría para el caso de que el operador los desee modificar. En ese caso el esquema de la propuesta planteada (Figura 3) incorpora una red neuronal artificial cuyo fin es detectar si la combinación de parámetros introducida por el operador llevaría a la planta a un estado de funcionamiento inestable. Si fuese así, la red neuronal restauraría la combinación de parámetros correspondiente al punto de operación en el que se esté trabajando, asegurando de esta forma que el sistema no se vuelva inestable. Tal y como se puede observar en la figura, la red neuronal posee dos estados posibles a la salida, si la combinación del operador es estable deja pasar los parámetros al controlador, si fuese inestable dejaría pasar los de la base de conocimiento.

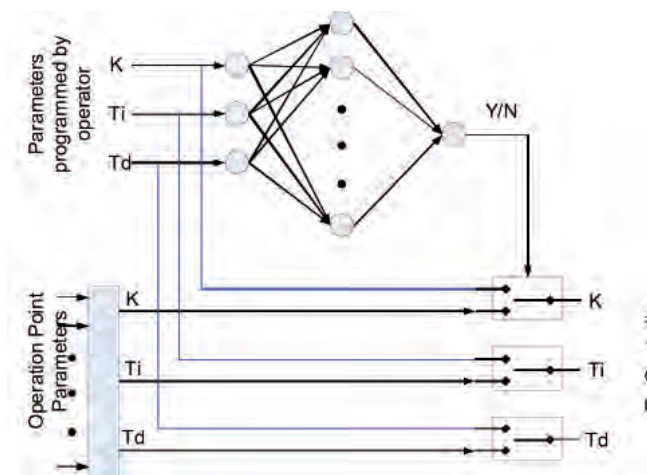


Figura 3: Estructura propuesta

#### 4. CONCEPTO DE ESTRUCTURAS DE ESTABILIDAD

Es necesario disponer de datos suficientes para entrenar la red neuronal. Para ello y con el fin presentado en el apartado anterior, se emplean las estructuras de estabilidad o inestabilidad, que son estructuras de datos que delimitan los dos estados en términos absolutos, sin tener en cuenta valores concretos de especificaciones que pueda tomar el funcionamiento del sistema. Para obtener las estructuras se han dispuesto los tres parámetros del controlador en sendos ejes de coordenadas y, para cada coordenada, se representa un estado de estabilidad o inestabilidad, obteniendo de este modo un volumen tridimensional de estabilidad o inestabilidad. El resultado es un volumen perfecto con una transición absoluta sin que los dos estados puedan coexistir. Para la obtención de las estructuras se seleccionarán puntos de operación representativos en los cuales se realizará una identificación de la planta. Con la función de transferencia hallada se implementa un lazo de control de tipo PID, en el que se hace un barrido de combinaciones de los parámetros comprobando si el sistema es estable o no. Representando todos los puntos de un estado (estabilidad o inestabilidad) se obtienen las estructuras. De esta forma se obtienen las estructuras cuyas formas dependen de la función de

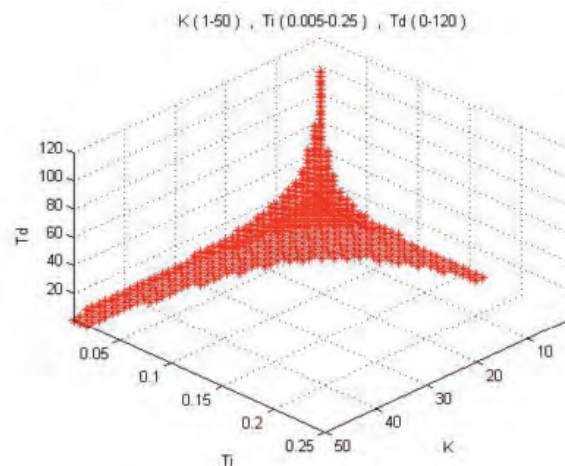


Fig. 4: Ejemplo de una estructura de estabilidad

transferencia de la planta a controlar. Existe abundante literatura relacionada con el problema de la estabilidad robusta que describe este concepto de forma clara. [17-23]. Un ejemplo de una estructura de estabilidad es mostrado en la Figura 4.

Se ha realizado un estudio de la respuesta ante entrada escalón de un sistema en puntos aleatorios en la zona limítrofe de transición entre estabilidad e inestabilidad (Figura 5), dos de ellos localizados en el borde en la zona estable (dentro de la estructura), y dos de ellos también en el borde en la zona inestable (fuera de la estructura).

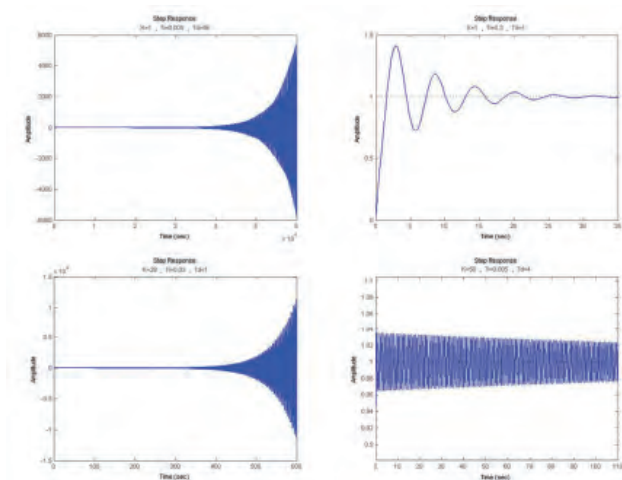


Fig. 5: Respuesta del sistema ante entrada escalón en las zonas limítrofes de funcionamiento

La obtención de las estructuras de estabilidad no siempre es posible. Sólo puede ser obtenido en aquellos casos en que la función de transferencia es conocida, o en sistemas en los que es posible pasarlo a la zona de estabilidad sin consecuencias no deseadas.

Es esencial denotar que las estructuras de estabilidad o inestabilidad están perfectamente separadas; nunca pueden



coexistir los dos estados. De esta forma se convierte en una herramienta que permite ser empleada en diferentes métodos de detección de áreas prohibidas de operación en sistemas regulados con controladores PID. En el ensayo de las combinaciones ejemplo de la Figura 5 se puede observar que para combinaciones estables la salida ante entrada escalón converge, sin embargo las inestables no. Se trata, por tanto, de una herramienta muy potente en el ámbito de los controladores autoajustables, cuyas ganancias están constantemente cambiando para adaptarse al proceso, con esta herramienta se previene que el sistema se haga inestable.

### 5. SISTEMA USADO PARA VERIFICAR EL MÉTODO PROPUESTO

La verificación del sistema propuesto se realiza sobre una pequeña planta de proceso de laboratorio que permite realizar un control de nivel de líquido en tanque. En la Figura 6 se muestra una fotografía del sistema así como un esquema representativo del mismo.

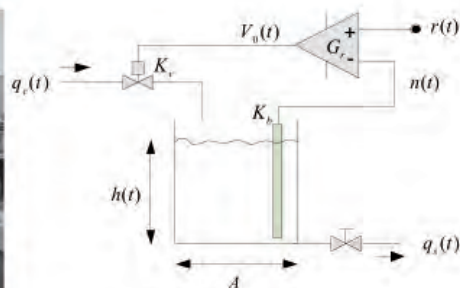


Fig. 6: Fotografía y esquema de la planta de laboratorio

El sistema consiste en un depósito, alimentado en su parte superior a través de una válvula proporcional, que será controlada para mantener el nivel de agua constante en el mismo, mientras se está vaciando a través de una restricción de salida. Las características del depósito son las que se indican seguidamente:

- A: Sección transversal del depósito (0.0063617m<sup>2</sup>)
- h: Nivel del líquido en el depósito (0-1 en tanto por uno)
- q<sub>e</sub>: Caudal de entrada al depósito, que se encuentra limitado entre 0 y 0.000122455m<sup>3</sup>/s
- q<sub>s</sub>: Caudal de salida del depósito (m<sup>3</sup>/s)
- a: Sección transversal de la restricción de salida (0.0001m<sup>2</sup>)
- g: Aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

El regulador se implementa virtualmente en *Matlab/Simulink*. La interface de las señales de la planta se hace con una tarjeta de adquisición de datos. Como señal de consigna la planta recibe el nivel de líquido deseado en el tanque y la señal de control proporcionada por el regulador actúa sobre

la válvula proporcional, controlando el caudal de entrada al depósito.

### 5.1. CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL SISTEMA

Las condiciones de operación del sistema son infinitas y por tanto habrá que seleccionar un número finito de posibilidades. En este sentido es necesario realizar una estimación coherente de la cantidad de puntos suficientes para conseguir buenos resultados. Una posibilidad es escoger una cantidad razonable de valores equidistantes y observar los cambios en los parámetros para cada caso. Si los cambios entre valores consecutivos son muy elevados es posible que sea preciso tomar valores intermedios.

Existen características propias del tanque como pueden ser el área de la base que no van a cambiar, independientemente del punto de operación en el que se esté operando. Para este caso el único parámetro que definirá el punto de operación es el nivel de líquido en el tanque. Es importante destacar que en condiciones de campo se pueden dar factores que lleven a tener en cuenta parámetros diferentes además del considerado en este trabajo. Teniendo en cuenta la planta piloto de laboratorio y los rangos de valores que puede tomar el nivel de líquido en el tanque se establecen las condiciones de operación mostradas en la Tabla I.

Nivel de líquido
10%
20%
30%
40%
50%
60%
70%
80%
90%

Tabla I: Puntos de trabajo seleccionados

Como se ha podido apreciar en las pruebas finales, los rangos de valores de nivel del tanque considerados son suficientes para cubrir el rango de operación del sistema.

### 5.2. OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL CONTROLADOR PARA CADA UNO DE LOS PUNTOS DE OPERACIÓN

En la fase de obtención de los parámetros del controlador para cada uno de los puntos de operación, para mayor sencillez, se ha dispuesto en la implementación práctica del controlador virtual, la posibilidad de seleccionar el realizar la realimentación mediante un bloque tipo relé o con un controlador tipo PID. Se hace de esta forma con el fin de facilitar la obtención de los parámetros del controlador mediante el método de Relay-Feedback que será expuesto seguidamente de forma resumida.

#### 5.2.1. Método de Relay Feedback

Se trata de un método alternativo al tradicional método de Ziegler-Nichols [24 – 28], cuyo objetivo es hallar la

ganancia crítica 'Kc' y el periodo de oscilación sostenida 'Tc' del sistema. El método de *Relay-Feedback* es desarrollado por Aström y Hägglud [9, 29, 30], y consiste en llevar al sistema a un estado de oscilación mediante la adición de un relé (Figura 7).

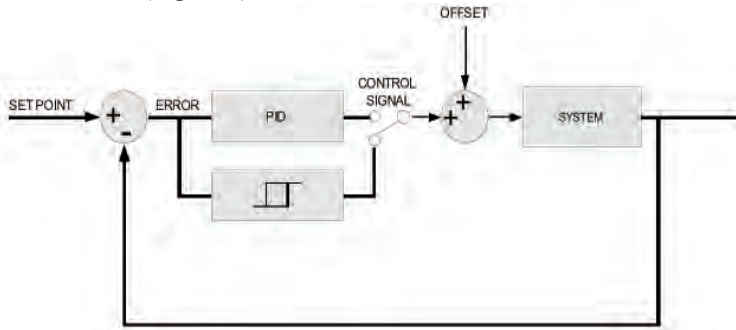
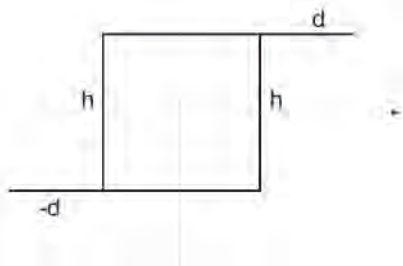


Fig. 7: Esquema típico de implementación del Relay-Feedback

En el experimento es conveniente emplear un relé con histéresis cuyas características son las mostradas en Figura



8, una amplitud 'd' y un ancho de la ventana de histéresis 'h'.

Fig. 8: Histeresis implementada en el relé

Una vez implementado el esquema de la Figura 7 se procede de la siguiente forma para obtener los parámetros mencionados de la respuesta del sistema Kc y Tc:

- Con la realimentación realizada a través de un controlador PID con cualquier valor de parámetros poner en funcionamiento el sistema hasta alcanzar el régimen permanente, anotando valores de la señal de control y salida del proceso.
- Seguidamente se realiza la realimentación mediante el relé. Como consigna se da el valor de la salida del proceso y como offset el valor de la señal de control del paso anterior.
- El proceso se pone en funcionamiento con las indicaciones realizadas en el paso anterior, y se aguarda hasta que la salida sea.
- Se anotan los dos parámetros indicados en la Figura 9 Tc y a.

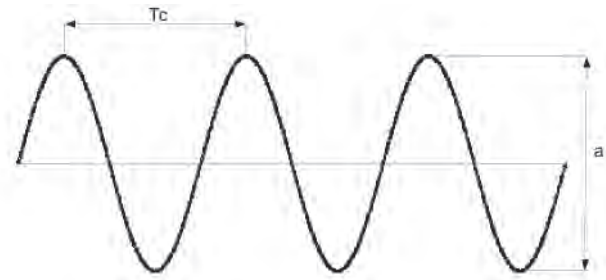


Fig. 9: Parámetros a anotar en el estado de oscilación

- La ganancia crítica del proceso Kc es determinada con la Expresión 2.

$$K_c = \frac{4d}{\pi \sqrt{a^2 - h^2}} \quad (2)$$

El método de *Relay Feedback* tiene la gran ventaja que se puede realizar en el punto de consigna en el que se esté operando, y se puede realizar en cualquier instante.

### 5.3. PROCEDIMIENTO SEGUIDO PARA LA PLANTA DE PRUEBAS

#### 5.3.1. Obtención de los parámetros Kc y Tc

Para el caso particular mostrado en este trabajo, no es necesario implementar la histéresis mencionada en la explicación del método de *Relay-Feedback* con un valor de ventana, dado que se está trabajando con un sistema relativamente lento. En su lugar se ha implementado un comparador simple (Figura 10) que resulta ser suficiente.

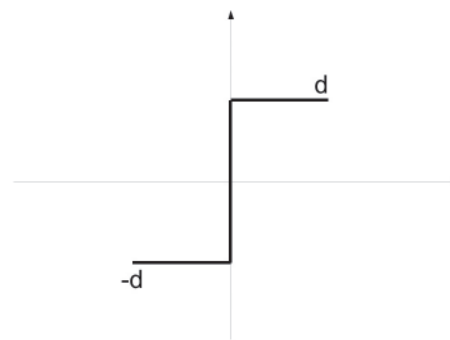


Fig. 10: Histeresis para la planta de pruebas

Para la Expresión 2 se tendrá por tanto que el valor de h es cero y el valor de d es 0.5. Se establece una consigna de 0.5 (50% de nivel), y en ese caso el *offset* no será necesario dando un valor de cero a esa entrada. Bajo esas condiciones el sistema se pone en marcha, y se obtiene como resultado la salida mostrada en la Figura 11.

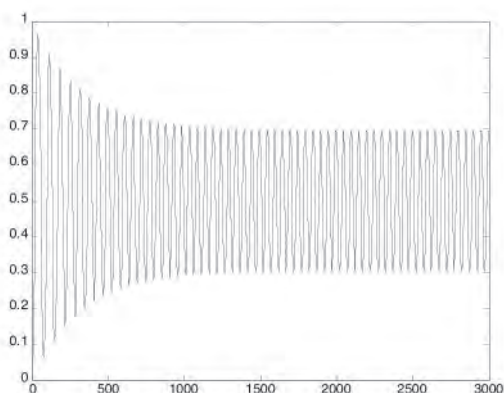


Fig. 11: Resultado de aplicación de Relay-Feedback en el punto de trabajo

Es necesario poner atención en la zona final de la gráfica, donde la oscilación se ha estabilizado: se toma en ese punto el periodo de oscilación  $T_c$  y con la expresión indicada previamente se obtiene el parámetro  $K_c$ .

**5.3.2. Obtención de los parámetros iniciales del controlador PID**

Con los valores de la respuesta obtenidos en el paso anterior, es posible hallar los parámetros de ajuste del controlador, mediante la aplicación directa de fórmulas, obteniendo de este modo los tres términos  $K$ ,  $T_i$  y  $T_d$ . Es deseable realizar un ajuste para cambios en la carga (rechazo a perturbaciones).

Si se tiene en cuenta esto las expresiones para ajustar el controlador de Ziegler-Nichols en lazo cerrado pueden ser aplicadas. Son fórmulas pioneras para la obtención de los parámetros del controlador de forma empírica y están optimizadas para el criterio de cambios en la carga. La especificación que se trata de obtener es de caída de la sobreoscilación en un cuarto, lo que significa que ante una perturbación el amortiguamiento en la segunda oscilación tiene  $\frac{1}{4}$  de valor del que se produce en la propia perturbación. Dichas expresiones se muestran en la Tabla 2.

$K$	$= 0.6 \times K_c$
$T_i$	$= 0.5 \times T_c$
$T_d$	$= 0.125 \times T_c$

Tabla 2: Fórmulas de Ziegler-Nichols para lazo cerrado

**5.3.3. Ajuste fino del controlador**

A los parámetros obtenidos en el párrafo anterior es posible que sea necesario someterlos a un ajuste fino, dado que los resultados pueden no ser óptimos.

En esta tarea delicada de ajuste es necesario indicar que no se ha de saturar la salida del controlador en ningún instante en la medida de lo posible. Además, es necesario adquirir un compromiso con un exceso de ganancia proporcional, lo que

da lugar a una rápida respuesta y un nivel de sobreoscilación no demasiado alto. Esto aparentemente puede parecer ideal, pero bajo esas condiciones la válvula proporcional está constantemente fluctuando lo que da lugar a su deterioro en un reducido periodo de tiempo.

Como conclusión, se tratará de conseguir salidas graduales, sin saturaciones o cambios repentinos como la que se puede observar en la Figura 12.

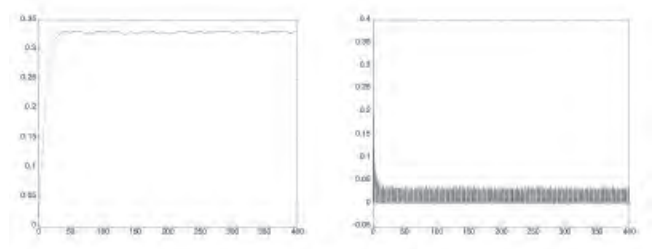


Figure 12: Ejemplo de nivel de líquido y valor de la señal de control hacia la válvula

**5.3.4. Parámetros obtenidos para cada caso**

Teniendo en cuenta todos los aspectos comentados en los apartados anteriores, se obtienen los valores de los parámetros del controlador con el correspondiente ajuste fino para cada uno de los puntos de operación indicado previamente. En todos los caso se han obtenido bajo un criterio de mínima sobreoscilación y máxima velocidad con las restricciones presentadas previamente. Los parámetros alcanzados son los que se muestran en la Tabla 3.

Nivel	$K$	$T_i$	$T_d$
10%	3.2	22	3.1
20%	3.0	27	3.9
30%	2.8	30	4.3
40%	2.5	33	4.6
50%	2.1	35	4.8
60%	2.0	36	5.1
70%	1.9	39	5.2
80%	1.6	40	5.3
90%	1.1	41	5.4

Tabla 3: Parámetros del controlador para cada punto de operación

**5.3.5. Implementación de la red neuronal**

Pese a que la red neuronal artificial tipo MLP (*Multi Layer Perceptron*) no es la mejor topología de red para clasificación, se ha empleado en este trabajo por obtenerse resultados satisfactorios. Dada la gran variedad de formas presentes en cada uno de los puntos de trabajo y teniendo en cuenta que estas no se adaptan a una función concreta, se ha optado por este método de clasificación frente a otros como *discriminantes lineales Fisher* o *árboles de decisión con poda*. Con ellos se obtienen errores de clasificación mayores que con el empleo de las redes neuronales, sobre



todo con los primeros. En primer lugar, ha sido necesario obtener la función de transferencia para cada punto de operación considerado. Para ello todas las funciones de transferencia de la planta se han obtenido por mínimos cuadrados mediante el método ARX empleando para ello la Toolbox de identificación de Matlab. Una vez que se dispone de las funciones de transferencia se obtienen las estructuras de estabilidad correspondientes, y con los puntos de esa estructura se lleva a cabo el entrenamiento de la red neuronal. Para cada punto de operación se obtendrá, por tanto, una red neuronal que posee una capa oculta, oscilando el número de neuronas en la capa oculta entre 6 y 8 para los puntos de operación considerados. La estructura de la red ha sido adoptada tras múltiples pruebas con diferentes números de neuronas en la capa oculta (las pruebas se ha realizado entre 4 y 9 neuronas) para cada una de las redes neuronales.

La función de activación de las neuronas en la capa oculta es de tipo tangente hiperbólica, excepto en la capa de salida en la que se ha empleado una función escalón. Una vez seleccionada la configuración se muestran las diferentes características obtenidas en el aprendizaje mediante el método de *backpropagation*. Los entrenamientos se han realizado en rangos entre 400 y 700 épocas, con un error al final del entrenamiento menor al 1% en todos los casos. Las redes neuronales artificiales han sido entrenadas offline, sin embargo la comprobación del correcto funcionamiento se ha llevado a cabo online.

## 6. IMPLEMENTACIÓN DEL MONTAJE Y VERIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS

La implementación del sistema ha sido realizada usando el entorno Matlab/Simulink, entre otras razones por haber empleado las redes neuronales artificiales. Para operar con la planta se ha optado por el uso de una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments cuyo modelo es USB-6008 12-bits 10 KS/s Multifunction I/O. Esta tarjeta es automáticamente reconocida por el software Matlab, y es relativamente sencillo interactuar con ella. El esquema del proceso es implementado en Simulink con un diagrama como el que se muestra en la Figura 13.

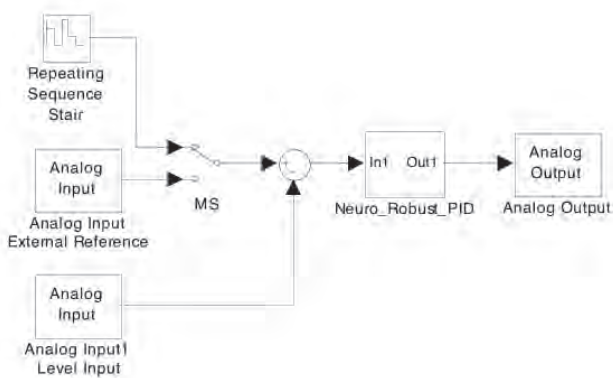


Fig. 13: Sistema implementado en Simulink

Existen dos posibilidades para indicar el punto de consigna. La primera de ellas es la generación de una secuencia de valores que se repite en el tiempo. La otra es indicar el valor de consigna mediante el uso de un voltaje externo (Analog Input Block Diagram). Por ello será necesario seleccionar entre una u otra posibilidad de introducción de consigna.

Para la lectura de los valores instantáneos de nivel de líquido en el tanque se usa un sensor de nivel por ultrasonidos cuya salida analógica se encuentra entre 0 y 10 voltios para el 0% y 100% de nivel respectivamente. Dicho sensor es conectado a una de las entradas de la tarjeta de adquisición de datos en modo diferencial (Analog Input 1). El siguiente paso es implementar el controlador previamente descrito, creando para ello el diagrama de bloques de la Figura 14.

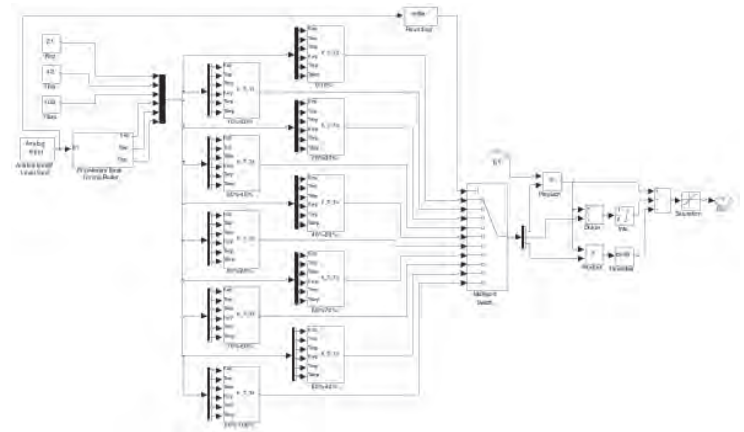


Fig. 14: Controlador implementado

Tal y como se puede observar en la Figura 14, lo que se ha hecho es integrar un controlador tipo PID cuyos parámetros son las salidas de un 'Multiport Switch', a su vez sus entradas dependerán del nivel de tanque leído por el sensor a través de la entrada analógica 2 y de los parámetros programados por el operador. En el esquema hay 10 bloques (*Range Blocks*), uno por cada rango de nivel (0%-10%, 10%-20%,..., 90%-100%), e internamente posee el esquema de la Figura 15.

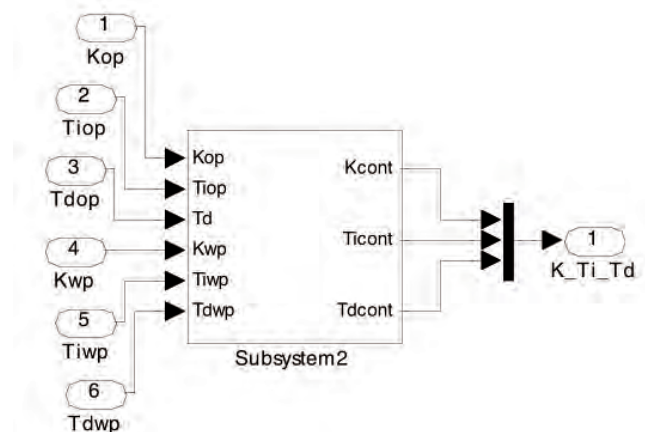


Fig. 15: Esquema interno de cada Range Block

A su vez dentro de cada 'Range Block' hay otro bloque 'Subsystem2', internamente posee el esquema de la Figura 16, que es la topología presentada en la Figura 3 implementada en Simulink de Matlab. En la Figura 17 se presenta la estructura de la red en simulink.

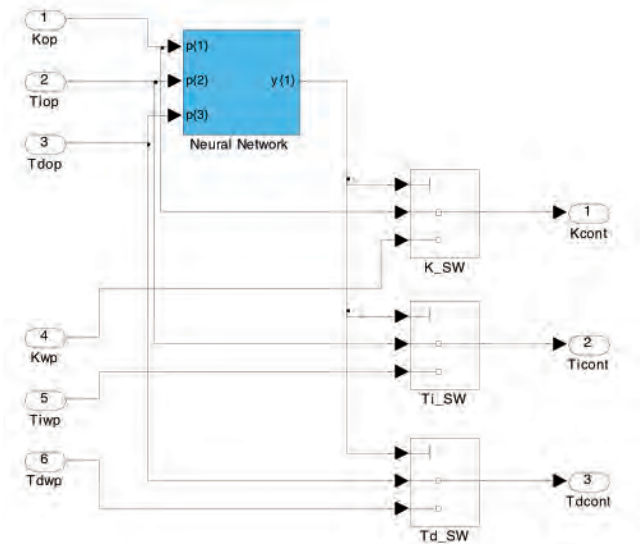


Fig. 16: Subsystem2 de la Figura 15

los toma como no válidos, y si se programa una secuencia en el bloque 'Repeating sequence Stair' de la Figura 13, el método selecciona los parámetros de controlador adecuados al punto de operación en el que se encuentre. Como ejemplo de ello se tiene la Figura 17, en la que se muestra la consigna indicada (trazo discontinuo) y la respuesta del sistema para ella. Se observa que la dinámica no varía en exceso pese a estar en diferentes puntos de operación.

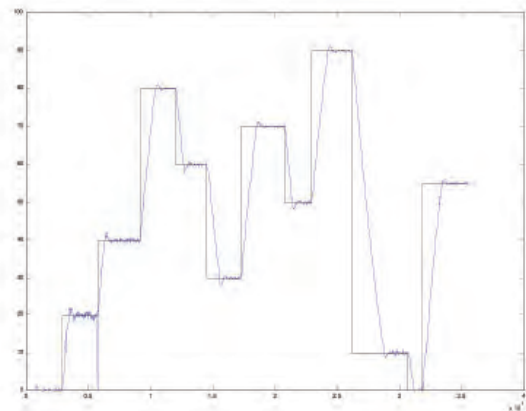


Fig. 18: Ejemplo de funcionamiento de la planta a lo largo del rango de operación con valores de parámetros del sistema (tiempo en milisegundos).

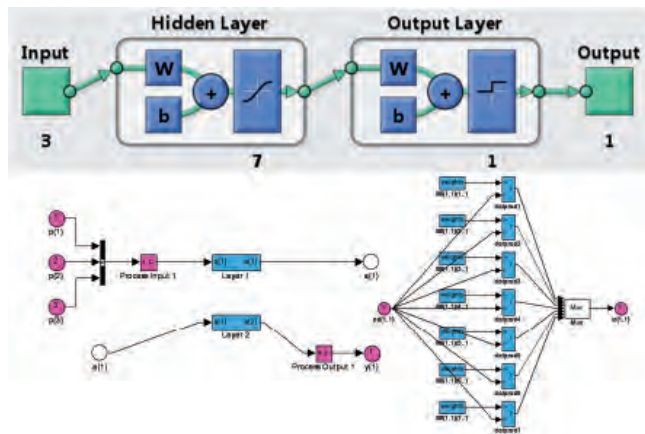


Fig. 17: Estructura de la red

Los pines In1 y Out1 de la Figura 14 son los pines del bloque Neuro\_Robust\_PID de la Figura 13, cuya señal de control se dispone en la salida analógica de la tarjeta de adquisición de datos, para actuar directamente sobre la válvula proporcional.

De este modo, el controlador implementado puede seleccionar los parámetros más apropiados para el punto en el que se está operando. Cuando el operador modifica los parámetros, el sistema propuesto los evalúa, y, si con ellos pasase a ser inestable, serán reemplazados por otros apropiados a ese punto de operación en el que se encuentre, garantizando de este modo la estabilidad. Si se indican unos parámetros de controlador de operador nulos, el sistema

Se muestra a continuación mediante un ejemplo gráfico en la Figura 18 el funcionamiento del método. Se fija una consigna a la planta, y una vez que está estabilizada la respuesta, se cambia a otro valor de consigna habiendo cambiado los parámetros del controlador a unos valores no deseados. Para el caso de la gráfica de la izquierda no se emplea el método en que las redes neuronales descartarían la combinación si fuese peligrosa. En cambio en la gráfica de la derecha se aplica la técnica. Tal y como se puede observar la respuesta es mucho más satisfactoria para este segundo caso.

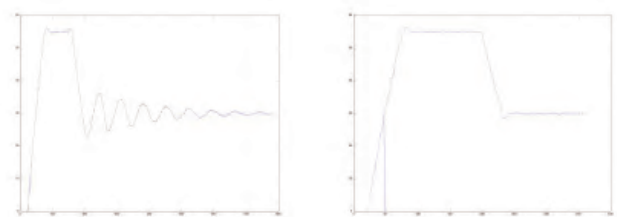


Fig.19: Ejemplo de empleo de la red neuronal para detectar combinaciones de parámetros peligrosas. Izquierda sin método, derecha con el.

## 7. CONCLUSIONES

En este estudio se presenta un nuevo modelo de controlador caracterizado por conservar las prerrogativas que concede el tradicional PID en el que está basado, así como la posibilidad de aplicarlo a sistemas de carácter no lineal manteniendo especificaciones invariables en todo el rango de trabajo. Está dotado, además, de la posibilidad de que un

operador humano de planta por razones de diversa índole modifique manualmente los parámetros del controlador con el objetivo de conseguir unas especificaciones determinadas, con la seguridad en todo momento de que el sistema no pase a una zona de funcionamiento no deseada de inestabilidad.

La propuesta realizada en esta investigación es una opción a tener en cuenta en sistemas no lineales que trabajen en todo el rango de operación, y que pueda ser dividido en zonas con un comportamiento lineal en las que el control con un regulador PID sea factible. Es por tanto una alternativa a diferentes tipos de controladores autoajustables. Es necesario resaltar que no es una solución sencilla de realizar, pero con los dispositivos de control programables actuales y con las herramientas computacionales existentes, el trabajo se vuelve comparativamente simple.

Tras múltiples pruebas de la técnica propuesta sobre la planta de laboratorio en la que se ha ensayado en los diferentes puntos de trabajo, los resultados obtenidos son satisfactorios y cuando el operador humano con el ánimo de obtener otras especificaciones de funcionamiento introduce combinaciones de parámetros peligrosas, el sistema es robusto y no permite que este se vuelva inestable restaurando la combinación programada de seguridad para el punto de operación en el que se encuentre. Considerando el tamaño del depósito en el que se produce un rápido llenado y un rápido vaciado del mismo, es necesario indicar que la técnica ha funcionado de forma muy satisfactoria, se resalta además que las especificaciones temporales son muy similares en todos los puntos de operación tras diferentes cambios llevados a cabo en el nivel de líquido, hecho muy importante para el caso de funcionamiento sin modificación de parámetros.

## 8. AGRADECIMIENTOS

Nuestro sincero agradecimiento a la Comunidad Europea del Carbón y del Acero (CECA) por su financiación en el proyecto SensorControlPilot "Implementation of sensor based on-line control of pickling lines" con referencia RFSP-CT-2007-00046.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Calvo-Rolle JL, Alonso-Alvarez A, Ferreiro-García R. "Using Knowledge Engineering in a PID Regulator in Non Linear Process Control" *Ingeniería Química*, Vol. 32, p. 21-28, 2007
- Machon-Gonzalez, I. Lopez Garcia, H. "End-point detection of the aerobic phase in a biological reactor using SOM and clustering algorithms", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 19, no.1, p. 19-28, February 2006
- Haber-Guerra R, Alique-López J, Haber Haber R, Villena Salinas P. "Diseño e implementación rápida de controladores inteligentes" *DYNA Ingeniería e Industria*, Vol. 83-8, p. 459-466, Nov. 2008
- Mindell DA. "Between human and machine: Feedback, Control, and Computing before Cybernetics" Johns Hopkins Paperbacks edition, 2004. 439p. ISBN 0-8018-6895-5
- Bennett S. "Nicolas Minorsky and the automatic Steering of Ships", *Control System Magazine*, Vol 4-4, p. 10-15, 1984

- Morari MH. "New techniques for PID Controller Design" Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON'01 Denver, USA, p. 764-769, 2001
- Astrom KJ, Hagglund T. "PID controllers: Theory, Desing and Tuning" ISA 2<sup>o</sup> ed. Research Triangle Park. 2006. 343p. ISBN 978-1-55617-516-9
- Feng YL, Tan KC. "PIDeasyTM and automated generation of optimal PID controllers" Third Asia-Pacific Conference on Control&Measurement China p. 29-33. August 1998
- Astrom KJ, Wittenmark B. "Adaptive Control". Addison Wesley Publishing Company. 1989. 574p. ISBN 0-201-55866-1
- Astrom KJ, Hagglund T. "The future of PID control", *Control Engineering Practice* Vol. 9-11 p. 1163-1175. 2001
- Morari M, Zafiriou E. "Robust Process Control", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989. 512p. ISBN 0-137-82153-0
- Camacho EF, Bordons C. "Model Prediction Control in the Process Industry, in: Advances in Industrial Control", Springer- Verlag, Berlin, 1995. 405p. ISBN: 1-85233-694-3
- Rugh WJ. "Analytical Framework for Gain Scheduling" *IEEE Control System Magazine*. Vol 11-1 p. 79-84, Jan.1991
- Clement B, Duc G. "An interpolation Method for Gain Scheduling" Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control. p. 1310-1315, Florida Dec.2001
- Lu WM, Zhou K, Doyle JC. "Stabilization of LFT systems" *IEEE Trans. on Aut. Cont.* Vol 2-11 p. 1239-1244, 1991
- Hiramoto K. "Active Gain Scheduling: A Collaborative Control Strategy between LPV Plants and Gain Scheduling Controllers" 16th IEEE International Conference on Control Applications. p. 385-390, Singapore, Oct.2007
- Gaston R, and Safonov M. "Exact calculation of the multiloop stability margin", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol 33-2 p. 156-171, 1988
- Barmish B. "New tools for robustness of linear systems", Macmillan Publishing Company, 1994
- Keel LH and Bhattacharyya SP. "Robust, Fragile, or Optimal" *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.2-4, p.1307-1313, 1997
- Canale M, Fiorio G, Malan S and Taragna M. "Robust tuning of PID controllers via uncertainty model identification", *European Journal of Control*, Vol.5, No.2, p. 316-328, 1999
- Voda A and Landau ID. "Applications of the KLV method for the auto-calibration of PID controllers" in Proc. of the 2nd IEEE Conference on Control Applications, p.829-834, 1993
- Dorato P, Yang W and Abdallah C. "Application of quantifier elimination theory to robust multi-objective feedback design", *Journal of Symbolic Computation*, Vol. 11, p.1-6, 1995
- Silva GJ, Datta A, Bhattacharyya SP. "PID controllers for time-delay systems" Birkäuser Boston 2005. 348p. ISBN: 0-817-64266-8
- Zhuang M and Atherton D. "Tuning PID controllers with integral performance criteria", in: Control'91, Heriot-Watt University, Edinburgh, UK, 1991.
- Cominos P and Munro N. "PID controllers: recent tuning methods and design to specifications", *IEE Proceedings Control Theory and Applications* Vol.149-1 p. 46-53, 2002
- Astrom KJ, Hagglund T, Panagopoulos H. "Design of PID controllers based on non-convex optimization", *Automatica* Vol. 34-5, p. 585-601, 1998
- Astrom KJ, Hagglund T. "Revisiting the Ziegler-Nichols tuning rules for PID control", *Asian Journal of Control* Vol. 4-4, p. 364-380, 2002
- Ziegler JG, Nichols NB. "Optimum settings for automatic controllers", *Transactions of ASME*, Vol. 64, p. 759-768, 1942
- Astrom KJ and Hagglund T. "Automatic tuning of simple regulators for phase and amplitude margins specifications." In Proceedings of the IFAC Workshop on Adaptive Systems in Control and Signal Processing, San Francisco, California, 1983.
- Astrom KJ, Hagglund T. "Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins" *Automatica* Vol.20-5, p. 645-651, 1984



# Control de Vibraciones en Pasarelas Peatonales



Carlos Mariano Casado-Sánchez\*

Ingeniero Industrial

Jesús de Sebastián-Sanz\*

Ingeniero Industrial

Iván Muñoz-Díaz\*\*

Dr. Ingeniero Industrial

Alfonso Poncela-Méndez\*\*\*

Dr. Ingeniero Industrial

Antolín Lorenzana-Ibán\*\*\*

Dr. Ingeniero Industrial

\* Centro Tecnológico CARTIF, Parque Tecnológico de Boecillo, Parcela 205 - 47151 Boecillo (Valladolid). Tfno: + 34 983 546504. carcas@cartif.es; jesseb@cartif.es

\*\* Universidad de Castilla-La Mancha, Edificio Politécnico, Av. Camilo José Cela, s/n - 13071 Ciudad Real. Tfno: +34 926 295300. ivan.munoz@uclm.es

\*\*\* Universidad de Valladolid, Paseo del Cauce 59 - 47011 Valladolid. Tfno: +34 983 423313. poncela@eis.uva.es; ali@eis.uva.es

Recibido: 29/09/2010 • Aceptado: 14/03/2011

## Vibration Control of Pedestrian Bridges

### ABSTRACT

• In the last years, a wide number of footbridges have been built as demand response of more direct pathways in cities. These structures have lower building requirements as compared with standard bridges. This circumstance has facilitated the development of new structural design with complex geometries and innovative materials. As a result, these structures may be slender, light and low damped, leading to vibration problems once in service. The current codes take into account this problem, and recommend designs with natural frequencies away from the typical pedestrian pacing rates and fix comfort limits to guarantee the serviceability of the structure.

This paper studies this problem from a practical point of view. Thus, the key points of codes and footbridges guidelines are showed, the typical experimental dynamic analysis techniques are presented, and the usual solutions adopted to improve the dynamic performance of these structures are discussed. Finally, the works carried out on the Valladolid Science Museum Footbridge by Centro Tecnológico CARTIF in collaboration with the Universities of Valladolid and Castilla-La Mancha are showed. These works include: (1) the dynamic study of the three steel spans of the footbridge, (2) the design and implementation of a tuned mass damper in the liveliest span, (3) the implementation of an active mass damper using an electrodynamic shaker, and (4) the development of field tests to assess the serviceability of such span.

• **Key words:** footbridges, vibration control, damping systems, passive control, active control, serviceability.

### RESUMEN

En los últimos años se ha construido un gran número de pasarelas peatonales como respuesta a la demanda de nuevas vías de paso en las ciudades. Estas estructuras tienen requisitos constructivos menos exigentes en comparación con otros tipos de puentes, lo cual ha facilitado el desarrollo de diseños con nuevos esquemas resistentes, complicadas geometrías y el empleo de nuevos materiales. En general estas estructuras son esbeltas, ligeras y poco amortiguadas, lo que en ocasiones ha generado problemas de vibraciones al paso de peatones una vez puestas en servicio. Las normativas actuales son cada vez más sensibles a esta problemática, recomendando diseños cuyas frecuencias naturales deben estar alejadas de los rangos de frecuencia de paso típicos de los peatones y fijando límites de confort en forma de valores

máximos de aceleración permitidos, asegurándose así un correcto comportamiento de la estructura.

En el presente artículo se analiza esta problemática desde un punto de vista práctico. Para ello se muestran los puntos clave de las normativas y guías de diseño de pasarelas que se pueden encontrar actualmente en la bibliografía, se presentan las técnicas que habitualmente se emplean en el análisis dinámico experimental de estas estructuras, y se comentan las soluciones a las que generalmente se recurre para mejorar su comportamiento dinámico. Por último, se muestran los trabajos llevados a cabo por el Centro Tecnológico CARTIF en colaboración con las Universidades de Valladolid y Castilla-La Mancha en la pasarela peatonal del Museo de la Ciencia de Valladolid. Estos trabajos incluyen: (1) el estudio dinámico de los tres vanos metálicos de di-

cha pasarela, (2) el diseño e implementación de un amortiguador de masa sintonizado en el vano más sensible a las vibraciones, (3) la implementación de un amortiguador de masa activo utilizando un excitador electrodinámico, y (4) el desarrollo de pruebas para la verificación del estado de servicio de la pasarela.

**Palabras clave:** pasarela peatonal, control de vibraciones, sistemas de amortiguamiento, control pasivo, control activo, estado de servicio.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las pasarelas peatonales son estructuras cada vez más habituales en las ciudades como consecuencia de una mayor demanda de nuevas vías de paso por parte de los peatones. Estas estructuras tienen requisitos constructivos menos exigentes en comparación con otros tipos de puentes, lo cual ha facilitado el desarrollo de diseños con nuevos esquemas estructurales, complicadas geometrías y el empleo de nuevos materiales como son los materiales compuestos de resina polimérica (Sobrinó y Pulido, 2002). Esto ha dado lugar a estructuras esbeltas, ligeras y poco amortiguadas. Algunas de estas pasarelas singulares experimentan elevados niveles de vibración al paso de peatones, lo cual puede afectar al estado de servicio y raramente lo hace a la seguridad.



Fig. 1: Pasarela "Millennium Bridge" de Londres. (Williams, 2001)

En general y sin obviar las cargas debidas al viento (Hernández-Vázquez, 2005), la principal fuente de vibraciones en las pasarelas son los propios peatones. En ocasiones, los movimientos armónicos de los peatones (andar, correr, etc.) coinciden con alguna de las frecuencias de vibración de la estructura, pudiendo dar lugar a fenómenos de resonancia que se traducen en altos niveles de vibración. Por otro lado, escenarios de carga excepcionales y que raramente se repiten más de una vez en la vida útil de la estructura, como es el caso del día de la inauguración de la estructura o el transcurso de una manifestación por ella, pueden poner de manifiesto problemas dinámicos debido a las elevadas cargas

a las que puede verse sometida la estructura. La pasarela *Millennium Bridge* de Londres (Fig. 1) es un ejemplo significativo de este tipo de sucesos. El 10 de junio de 2000, día de su inauguración, dicha pasarela experimentó elevadas aceleraciones laterales que provocaron el cierre de la misma y su posterior reparación (Dallard et al., 2001). La reparación consistió en la incorporación de numerosos amortiguadores de masa sintonizados para disminuir las vibraciones verticales y varios amortiguadores viscosos para reducir las vibraciones laterales (Fig. 2). El coste de la reparación de la estructura fue de 5 millones de libras lo que supuso un 20 % del coste final (Russell, 2002). El mismo problema fue detectado un año antes en la pasarela de Solferino en París, lo que provocó tanto la implementación de sistemas de amortiguamiento como un mayor estudio en el modelado de las cargas ejercidas por los peatones (Sétra, 2006). Estos dos ejemplos ponen de manifiesto la importancia de considerar las cargas dinámicas en el diseño de las pasarelas.



Fig. 2: Detalle de los sistemas de absorción de vibraciones de la pasarela "Millennium Bridge": a) amortiguadores de masa sintonizados, b) amortiguador viscoso. (Williams, 2001)

Como respuesta a esta problemática, las normativas actuales prestan cada día más atención a los posibles problemas dinámicos y al estado de servicio de las pasarelas. En general, dichas normativas dan recomendaciones para el diseño y fijan límites de confort tal que se asegure un correcto estado de servicio de estas estructuras a lo largo de su vida útil.

En el presente trabajo se comentan las principales recomendaciones de las normativas en vigor, tanto nacionales como internacionales, y algunas de las guías de diseño de

pasarelas peatonales publicadas hasta la fecha. Posteriormente, se muestran las técnicas que se emplean habitualmente en el estudio experimental del comportamiento dinámico de estas estructuras y se presentan las soluciones más comunes para reducir el nivel de vibración en las pasarelas. Por último, se muestran los trabajos llevados a cabo por personal del centro tecnológico CARTIF en colaboración con las Universidades de Valladolid y Castilla-La Mancha en el análisis y control de vibraciones de la pasarela del Museo de la Ciencia de Valladolid. El grupo de control de estructuras y de diseño estructural del centro tecnológico CARTIF trabaja tanto en análisis dinámico de estructuras civiles como en el diseño de sistemas de absorción vibraciones pasivos y semiactivos para pasarelas peatonales (Casado et al., 2008), pasivos para grúas torre (de Sebastián et al., 2009), adaptativos para viaductos (Casado et al., 2007), y pasivos, activos e híbridos para edificios (Poncela et al., 2007).

## 2. NORMATIVAS Y GUÍAS DE DISEÑO DE PASARELAS PEATONALES

Las normativas de puentes y pasarelas peatonales prestan cada vez más atención a los posibles problemas dinámicos y al análisis del estado de servicio de dichas estructuras. De forma general, dichas normativas recomiendan evitar que los modos principales de las pasarelas estén dentro de los rangos de frecuencia de paso típicos de los peatones (incluyendo andar y correr), y establecen valores límite de aceleración vertical y lateral tal que se asegure el estado de servicio de la estructura. Por otro lado, en algunas normativas, como es el caso de los Eurocódigos, se formulan diferentes estados de carga que deben ser analizados por el diseñador de la estructura.

En la Tabla 1 se muestran los rangos críticos de frecuencia y los límites de aceleración de las principales normativas nacionales e internacionales. Esta Tabla es una actualización de las tablas presentadas en la guía de diseño de pasarelas de la Federación Internacional para el Hormigón Estructural (FIB, 2005). Las variables  $f_v$  y  $f_h$  son, respectivamente, la

Normativas	Frecuencias críticas (Hz)		Aceleraciones máximas de confort (m/s <sup>2</sup> )	
	Vertical	Lateral	Vertical	Lateral
Eurocódigo 0 – Anejo 2 (EN1990 – Annex A2)	<5	<2.5	0.7	0.2(0.4)
Eurocódigo 1 (EN1991)	<5	<2.5	min(0.5√ $f_v$ , 0.7)	min(0.14√ $f_h$ , 0.15)
Eurocódigo 2 (ENV1992-2)	1.6 - 2.4	0.8 - 1.2		
Eurocódigo 5 (ENV1995-2)	<5	<2.5	0.7	0.2
RPX95, RPM95 (España)			0.5√ $f_v$	
EAE (España)	1.6 - 2.4, 3.5 - 4.5	0.6 - 1.2	min(0.5√ $f_v$ , 0.7)	0.2(0.4)
BS 5400 (Reino Unido)	<5		0.5√ $f_v$	
Din-Fachberitch 102 (Alemania)	1.6 - 2.4, 3.5 - 4.5		0.5√ $f_v$	
SIA 260 (Suiza)	1.6 - 4.5	<1.3		
AASHTO 1997 (USA)	<3			
ONT83 (Canada)			0.25(√ $f_v$ ) <sup>0.78</sup>	
Austroroads (Australia)	1.5 - 3			
Normativa de Pasarelas japonesa (1979)	1.5 - 2.3		1	
AISC Guide 11			100x	(Curva base) (Iso 2631-2)
VDI 2057			0.6( $f_v$ )	0.214
ISO 10137	1.7 - 2.3		60x	(Curva base) (Iso 2631-2)

Tabla 1: Frecuencias críticas y valores de aceleración máximas de confort



frecuencia de los modos verticales y laterales de la estructura.

Como se observa en la Tabla 1, la normativa española propone rangos de frecuencia críticos y valores de aceleración máximos de confort que están recogidos en varios documentos (RPM95, RPX95 y EAE). Así, en la nueva instrucción de acero estructural (EAE, 2010), todavía en fase de proyecto, se recomienda que las pasarelas peatonales eviten que sus modos verticales estén comprendidos en el rango de 1.6 Hz a 2.4 Hz, y en el rango de 3.5 Hz a 4.5 Hz, mientras que se fija la aceleración vertical máxima de confort en  $0.5\sqrt{f_v}$  m/s<sup>2</sup>, sin que en ningún caso se supere 0.7 m/s<sup>2</sup> cuando un peatón de 750N de peso camine o corra sobre el tablero. También se aconseja evitar modos de vibración lateral o de torsión situados en el rango de 0.6 Hz a 1.2 Hz. En este caso, las aceleraciones horizontales máximas no deberían superar 0.2 m/s<sup>2</sup> en condiciones de uso normal, y 0.4 m/s<sup>2</sup> en condiciones de aglomeraciones excepcionales. Por otro lado, en las recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos (RPX95, 1996) y metálicos (RPM95, 1996) del Ministerio de Fomento se establece  $0.5\sqrt{f_v}$  m/s<sup>2</sup> como valor límite de aceleración vertical y se relaciona este límite en aceleración con la flecha en el centro del vano del puente por medio de una formulación sencilla.

En el caso de España, la legislación actual sólo obliga verificar el estado de servicio en algunos casos y normalmente queda a criterio del diseñador o del propietario de la estructura la realización de las mismas. Así, la Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP, 2003) establece la realización de pruebas de carga estática antes de la puesta en servicio de cualquier puente con vanos superiores a 12 metros, mientras que las pruebas dinámicas solo son preceptivas para vanos mayores de 60 metros o si se prevé que las vibraciones puedan afectar a la funcionalidad de la estructura. Para la realización de pruebas de carga dinámicas, el Ministerio de Fomento editó en 1999 un documento con las recomendaciones para la realización de pruebas de recepción en puentes de carretera que también es aplicable a pasarelas peatonales (Ministerio de Fomento, 1999). En dicho documento se dan algunas pautas para la realización de las pruebas de carga dinámica en pasarelas.

Además de los valores máximos de aceleración fijados en las normativas ya mencionadas, existen otras normativas que tratan el tema de las vibraciones que afectan a las personas (por ejemplo en edificios) cuantificando el valor de la vibración mediante otros índices, como es el MTVV (*Maximum Transient Vibration Value*) o los dosados de vibración (VDV) (ISO 2631-1, 1997). Aunque estos índices no están incluidos en las normativas referentes a puentes y pasarelas, podrían aportar más conocimiento sobre el estado de servicio de las mismas.

Por otro lado, se han publicado en los últimos años guías de diseño de pasarelas peatonales donde se trata con detenimiento el problema de las vibraciones y se sugieren distintas soluciones para mejorar su respuesta dinámica en el caso de tener un nivel excesivo de vibraciones. Algunas de éstas son las publicadas por la ya mencionada *Federación*

*Internacional para el Hormigón Estructural* (FIB, 2005), la guía francesa del *Service d'Etudes techniques des routes et autoroutes* (Sétra, 2006) o la guía publicada como resultado del proyecto europeo "*Human induced Vibrations on Steel Structures*" (Hivoss, 2008). En la primera de las guías se trata sobre diversos aspectos del diseño y la construcción de pasarelas, y en el capítulo 5 dedicado a la dinámica de la estructura se resumen los rangos de frecuencia críticos, las aceleraciones límite de confort y los distintos modelos de carga a analizar en la fase de diseño que se encuentran en normativas y publicaciones especializadas. Las otras dos guías se centran exclusivamente en el análisis del comportamiento dinámico frente a las cargas de los peatones y presentan dos metodologías similares para el análisis del grado de confort de las pasarelas peatonales en su etapa de diseño.

En las guías también se remarca la importancia del cliente o propietario de la estructura, el cual es el responsable de definir todos los posibles estados de carga que deben ser analizados en la fase de diseño y el grado de confort deseado para cada uno de ellos. También se presta especial atención al efecto del *lock-in* o de sincronización forzada. Este fenómeno que tuvo lugar tanto en la pasarela de *Solferino* como en la pasarela *Millennium Bridge*, consiste en la excitación del modo de flexión lateral de la estructura cuando los peatones sincronizan su paso con dicho modo. El organismo francés Sétra (Sétra, 2006) y la ingeniería ARUP (Fitzpatrick, 2001) estudiaron, respectivamente, este fenómeno en las pasarelas mencionadas. Los estudios concluyeron que el *lock-in* se caracteriza por generarse a partir de un número crítico de peatones o bien al superar un cierto valor de aceleración crítica (0.10-0.15 m/s<sup>2</sup>).

### 3. ANÁLISIS DINÁMICO EXPERIMENTAL Y SOLUCIONES ADOPTADAS

La caracterización experimental del comportamiento dinámico de las pasarelas peatonales puede realizarse en dos niveles de complejidad según sean las características de la estructura y el objetivo del estudio. En un primer nivel se identifican los parámetros dinámicos de la estructura, y en un segundo nivel se realizan medidas de la respuesta dinámica de la estructura frente a diferentes escenarios de carga de peatones.

En el primer nivel de estudio se identifican las frecuencias naturales, los modos de vibración, los coeficientes de amortiguamiento y las masas modales correspondientes a los modos de vibración de la pasarela con el objeto de ajustar los modelos numéricos desarrollados en la etapa de diseño y calcular los parámetros óptimos de los sistemas de absorción de vibraciones en el caso de que fueran necesarios. En general, los parámetros dinámicos se identifican a partir de los registros de aceleración en dirección vertical, lateral y longitudinal en puntos clave del tablero, pilas y otros elementos de la estructura en situaciones de respuesta ambiental, libre o

forzada. Los registros se tratan posteriormente con técnicas como (1) el análisis espectral en el que sólo se calculan las frecuencias naturales de la estructura, (2) el análisis modal clásico (EMA – *Experimental Modal Analysis*), donde se mide la respuesta de la estructura ante una entrada conocida que se genera por medio de dispositivos mecánicos como martillos instrumentados y excitadores electrodinámicos, o (3) el análisis modal operacional (OMA – *Operational Modal Analysis*) cuya principal ventaja frente al anterior es que no es necesario excitar a la estructura de forma controlada. Las dos últimas técnicas identifican además de las frecuencias naturales, los modos y amortiguamientos modales de la estructura. En el caso del EMA los modos obtenidos se pueden normalizar, por lo que es posible estimar las masas modales a partir de ellos. En el caso de las frecuencias naturales, es aconsejable identificar éstas con la estructura vacía y en servicio de forma que se obtenga el rango de frecuencias en el que pueden cambiar los modos principales en cualquier escenario de carga.

En el segundo nivel se evalúa el estado de servicio de la estructura y se correlacionan las respuestas experimentales de la estructura con las obtenidas mediante simulación en la etapa de diseño. La guía de diseño de pasarelas Hivoss (2008) sugiere que estos estudios deberían establecerse como pruebas estándar que se deben realizar una vez finalizada la construcción de cualquier pasarela peatonal flexible y poco amortiguada. Una vez analizados los resultados de estos estudios, el propietario de la estructura es el que decide si es necesario o no modificarla para mejorar su comportamiento dinámico.

Las soluciones que habitualmente se emplean para mejorar el comportamiento dinámico de las pasarelas son: (1) diseñar tal como sugieren las normativas, de forma que se evite que las frecuencias naturales estén dentro del rango de frecuencias de paso típicas de los peatones, (2) aumentar la rigidez de la estructura, lo cual implica modificaciones del diseño original, (3) incrementar el peso de la estructura para reducir la influencia de los peatones en su respuesta y, (4) incrementar el amortiguamiento de la estructura mediante el uso de dispositivos y sistemas de absorción de vibraciones.

En la fase de diseño es posible evaluar la viabilidad de todas estas soluciones, pero si la estructura está construida, el aumento de la rigidez y de la masa es complicado y puede implicar cambios tanto estructurales como no estructurales significativos, por lo que el aumento del amortiguamiento ha resultado ser en la práctica la opción más efectiva y viable. En pasarelas peatonales se emplean generalmente absorbentes pasivos de vibraciones, siendo los más eficientes y comunes los amortiguadores de masa sintonizados o TMDs (*Tuned Mass Damper*) y los amortiguadores viscosos. Otras soluciones menos habituales son los amortiguadores de líquido y columna de líquido sintonizado (TLDs y TLCDs), los amortiguadores visco-elásticos, y los amortiguadores de fricción seca. Un ejemplo de pasarela peatonal con TMD en España es la pasarela de Abandoibarra en Bilbao (Dyna, 1997).

## 4. CASO PRÁCTICO: ANÁLISIS Y MEJORA DEL COMPORTAMIENTO DE LA PASARELA DEL MUSEO DE LA CIENCIA DE VALLADOLID

A continuación se presentan los trabajos llevados a cabo por el centro tecnológico CARTIF en colaboración con las Universidades de Valladolid y de Castilla-La Mancha para el análisis dinámico y control de las vibraciones en la pasarela peatonal del Museo de la Ciencia (PMC) de Valladolid.

### 4.1 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

La PMC de Valladolid inaugurada en 2004 (Fig. 3) consta de un vano de hormigón de 45 metros y tres vanos metálicos de 51, 111 y 21 metros de luz. De aquí en adelante se identifican estos vanos como vano 1, 2, 3 y 4, respectivamente. La tipología resistente de los vanos metálicos es de entramado triangulado de barras tubulares con sección hexagonal, donde el vano 3, el más largo, cuenta con un sistema de pretensado (Ladret y González, 2005) formado por un conjunto de cables longitudinales y transversales cuyo fin es el de estabilizar dicho vano al paso de los peatones (Gómez, 2004).



Fig. 3: Vista general de la PMC de Valladolid

### 4.2 ANÁLISIS DINÁMICO EXPERIMENTAL

El objetivo de estos estudios era el de conocer de la forma más fiable posible los parámetros modales de la estructura. En primer lugar se realizó un análisis espectral de los registros de aceleración en dirección vertical y lateral. Las mediciones se realizaron en varios puntos del tablero de los tres vanos metálicos. Una vez analizados los espectros de aceleración se identificaron cuáles de las posibles frecuencias naturales obtenidas en los espectros estaban dentro de los rangos de frecuencia críticas. Así, en la dirección vertical, las frecuencias de 3.5 Hz del vano 2 y de 1.21, 2.55 y 4.67 Hz del vano 3 estaban en el rango de frecuencias críticas (<5 Hz, según EN1990), mientras que en la dirección lateral la frecuencia de 2.3 Hz del vano 2 y la de 1.15 Hz del vano 3 son las únicas que estaban en el rango de frecuencia críticas laterales (<2.5 Hz, según EN1990). En la Fig. 4 se muestran dos de los espectros obtenidos de los registros de aceleración vertical en el centro del vano 2 y del vano 3.

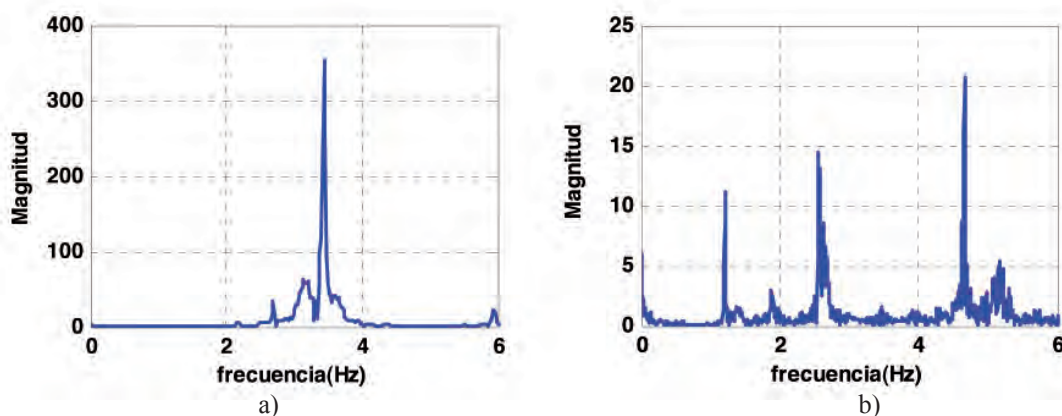


Fig. 4: Ejemplos de espectros de la aceleración vertical en el centro del vano 2 (a) y del vano 3 (b).

Por otro lado se observó que los niveles de vibración en la dirección lateral eran considerablemente menores que en la dirección vertical, y que el nivel de vibraciones del vano 2 era notablemente mayor que el del vano 3 y era relativamente habitual que dicho vano 2 entrara en resonancia al paso de un peatón corriendo. Todo esto se concluyó tras monitorizar durante más de un mes las aceleraciones verticales y laterales en el centro de cada uno de los tres vanos metálicos de la pasarela.

Posteriormente y con el fin de conocer a qué modos de vibración vertical correspondían las frecuencias identificadas en el análisis espectral, se realizó un OMA de la pasarela. Para este análisis se obtuvieron registros de aceleración en dirección vertical en 75 puntos distribuidos a lo largo de los tres vanos metálicos de la pasarela utilizando una frecuencia de muestreo de 100 Hz. Cada registro consistió en la lectura durante 720 segundos de ocho acelerómetros, siendo tres de ellos de referencia (uno por vano). Los parámetros modales se identificaron empleando tres técnicas en el dominio de la frecuencia. Estas son: FDD (*Frequency Domain Decomposition*), EFDD (*Enhanced Frequency Domain Decomposition*) y CFDD (*Curve-Fit Frequency Domain*

*Decomposition*). Los valores obtenidos con las tres técnicas están recogidos en la Tabla 2.

Por otro lado, en la Fig. 5 se muestran los tres primeros modos de flexión del vano 3 y el primer modo de flexión del vano 2.

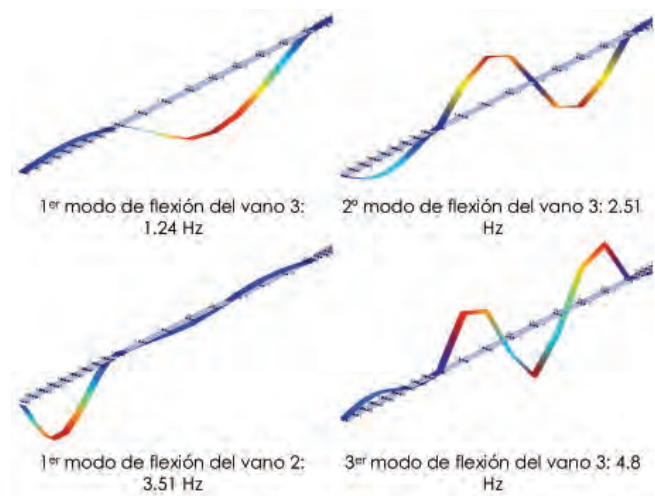


Fig. 5: Primeros modos de flexión de los vanos 2 y 3 de la PMC

FDD		EFDD		CFDD	
Frec. (Hz)	Amort. (%)	Frec. (Hz)	Amort. (%)	Frec. (Hz)	Amort. (%)
<b>Vano 2</b>					
3.516	-	3.514	0.647	3.515	0.636
7.397	-	7.406	0.562	7.399	0.506
9.351	-	9.365	0.552	9.367	0.387
<b>Vano 3</b>					
1.245	-	1.243	1.173	1.257	1.233
2.759	-	2.763	0.563	2.765	0.914
4.785	-	4.792	0.345	4.792	0.327
<b>Vano 4</b>					
8.521	-	8.562	0.568	8.545	0.585
11.5	-	11.36	1.583	11.34	1.11

Tabla 2: Valores de frecuencia y amortiguamiento de los primeros modos de flexión de la PMC obtenidos con el OMA



### 4.3 AMORTIGUADOR DE MASA SINTONIZADO PARA EL VANO 2 DE LA PMC

Una vez comprobado que las vibraciones verticales del vano 2 de 51 metros eran las de mayor nivel, y que su primer modo de flexión entraba fácilmente en resonancia al paso de peatones corriendo, se decidió diseñar e implementar un amortiguador de masa sintonizado (TMD) para su montaje temporal en el centro del vano.

Un TMD consiste básicamente en una masa acoplada a la estructura por medio de muelles y amortiguadores viscosos cuyo objetivo es la mejora del comportamiento dinámico de la estructura en torno a la frecuencia natural a la que ha sido sintonizado. Habitualmente este dispositivo es pasivo, aunque también hay realizaciones activas y semiactivas que mejoran su eficacia.

Para el diseño del TMD sintonizado al primer modo de flexión del vano 2, fue necesario identificar lo más fiablemente posible sus parámetros modales (frecuencia natural, amortiguamiento y masa modal). La frecuencia natural quedó perfectamente identificada tanto con el análisis espectral como con el OMA. Por otro lado, la cuantificación del amortiguamiento es más complicada y los valores que se obtienen con el OMA son variables y dependientes de los parámetros de la identificación, por lo que fue necesario realizar una identificación más fiable de este parámetro. Para ello se estudió la respuesta amortiguada de la aceleración vertical en el centro del vano tras hacerle entrar en resonancia. A dicha respuesta se le aplicó el método de decremento logarítmico con el que se obtuvo un valor de 0.6%, que en este caso coincidió con los valores estimados en el OMA. Por último, la masa modal se estimó en un valor de 18000 Kg a partir del ajuste de la función de respuesta en frecuencia (FRF) obtenida experimentalmente con un excitador electrodinámico y la medida de la aceleración en el centro del vano.

Una vez conocidos los parámetros modales del primer modo de flexión del vano 2, la masa móvil del TMD se fijó en 185 kg, es decir, aproximadamente el 1% de la masa modal. Esta razón de masa supone teóricamente aumentar el amortiguamiento desde un 0.6% a un 4%, lo que significa

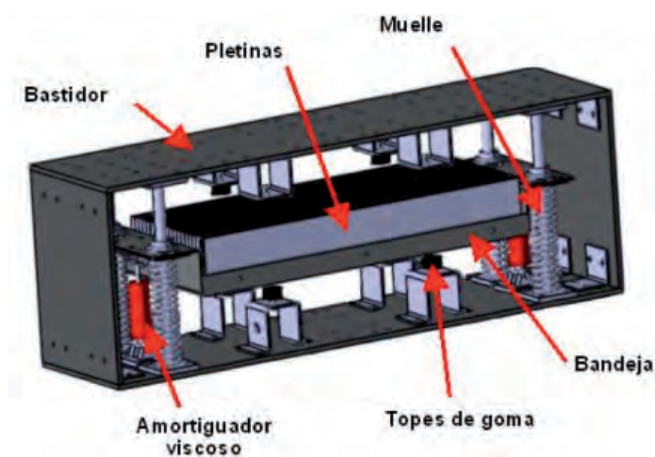


Fig. 6: Prototipo del TMD

una importante mejora en el comportamiento dinámico del vano. Para el cálculo del resto de los parámetros del TMD, amortiguamiento y frecuencia, se emplearon varias formulaciones de sintonizado óptimo (Connor, 2003) con las que se obtuvo un conjunto de valores iniciales (masa: 185 kg, frecuencia: 3.45 Hz, rigidez: 87015 N/m y amortiguamiento 537 Ns/m) que fueron ajustados in-situ una vez instalado el TMD en la pasarela.

En la Fig. 6 se muestra un esquema del TMD diseñado y posteriormente implementado. En ella se observa como la masa del TMD está formada por una serie de pletinas de acero que descansan sobre una bandeja, la cual se une al bastidor del TMD por medio de cuatro muelles y dos amortiguadores viscosos. Por otra parte, la geometría del conjunto se diseñó teniendo en cuenta el reducido espacio disponible debajo del tablero de la pasarela. En la Fig. 7 se muestra tanto el montaje final del TMD en la PMC como un detalle del mismo.

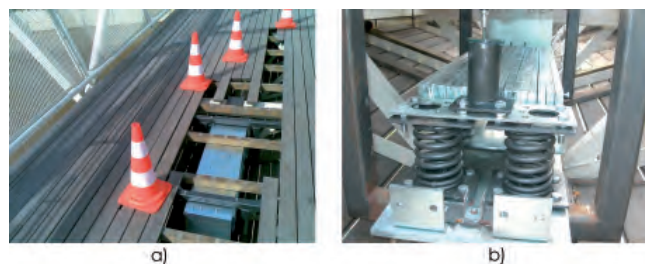


Fig. 7: a) Montaje temporal del TMD en el centro del vano 2 b) Detalle del TMD

Una vez instalado el TMD se realizó un ajuste fino de su masa para optimizar su comportamiento dinámico. En la Fig. 8 se presentan las FRF experimentales entre la aceleración de la estructura y la fuerza de excitación obtenidas en el centro del vano 2 con el TMD ajustado y sin él. En la figura se observa como el modo de flexión de 3.5 Hz que queremos amortiguar se ha desdoblado en dos modos. El objetivo del diseño del TMD y del posterior ajuste fino era el de obtener esos dos modos con la mínima y al mismo tiempo similar amplitud. La distancia entre estos dos modos depende del valor de la razón de masa del TMD (Connor, 2003).

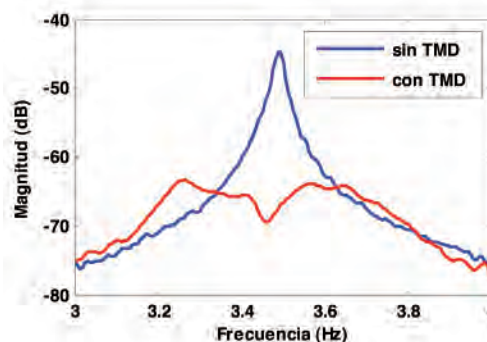


Fig. 8: FRF experimental del vano 2 de la pasarela con y sin el TMD en el centro del vano.

#### 4.4 AMORTIGUADOR DE MASA ACTIVO PARA EL VANO 2 DE LA PMC

Con el objetivo de amortiguar las vibraciones en el mismo vano, también se implementó en el centro del vano un actuador de masa inercial como el que se muestra en la Fig. 9, y se diseñó una ley de control basada en la aplicación de una red en retraso a la aceleración de la estructura, la cual se mide directamente con un acelerómetro. El actuador de masa inercial consistió en un excitador electrodinámico comercial, el cual consta de una masa de unos 30 Kg. suspendida por un conjunto de bandas elásticas y cuya posición vertical está

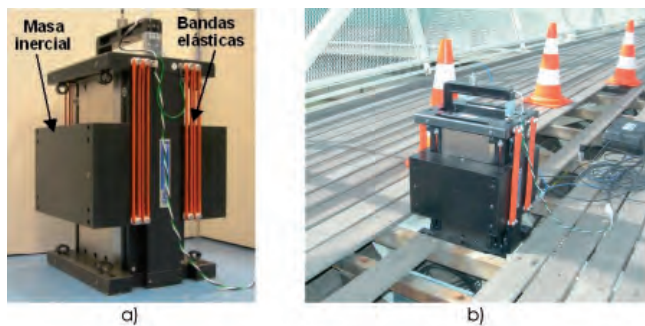


Fig. 9: Excitador electrodinámico (APS 400). a) Detalle del actuador. b) Montaje en el centro del vano 2 de la PMC

controlada por una serie de bobinas eléctricas que generan un campo magnético variable (APS Dynamics).

El funcionamiento de la ley de control es básicamente el mostrado en el diagrama de la Fig. 10. En él se observa como la variable de control, en este caso la aceleración vertical en el centro del vano 2, trata de seguir la señal de referencia, la cual ha sido fijada a un valor nulo. Para ello, el controlador genera una señal “inteligente” de voltaje que comanda al actuador y que se traduce en una fuerza inercial transmitida a la estructura. En Díaz y Reynolds (2010) se pueden encontrar más detalles del diseño de esta ley de control.



Fig. 10: Esquema de la ley de control del amortiguador de masa activo

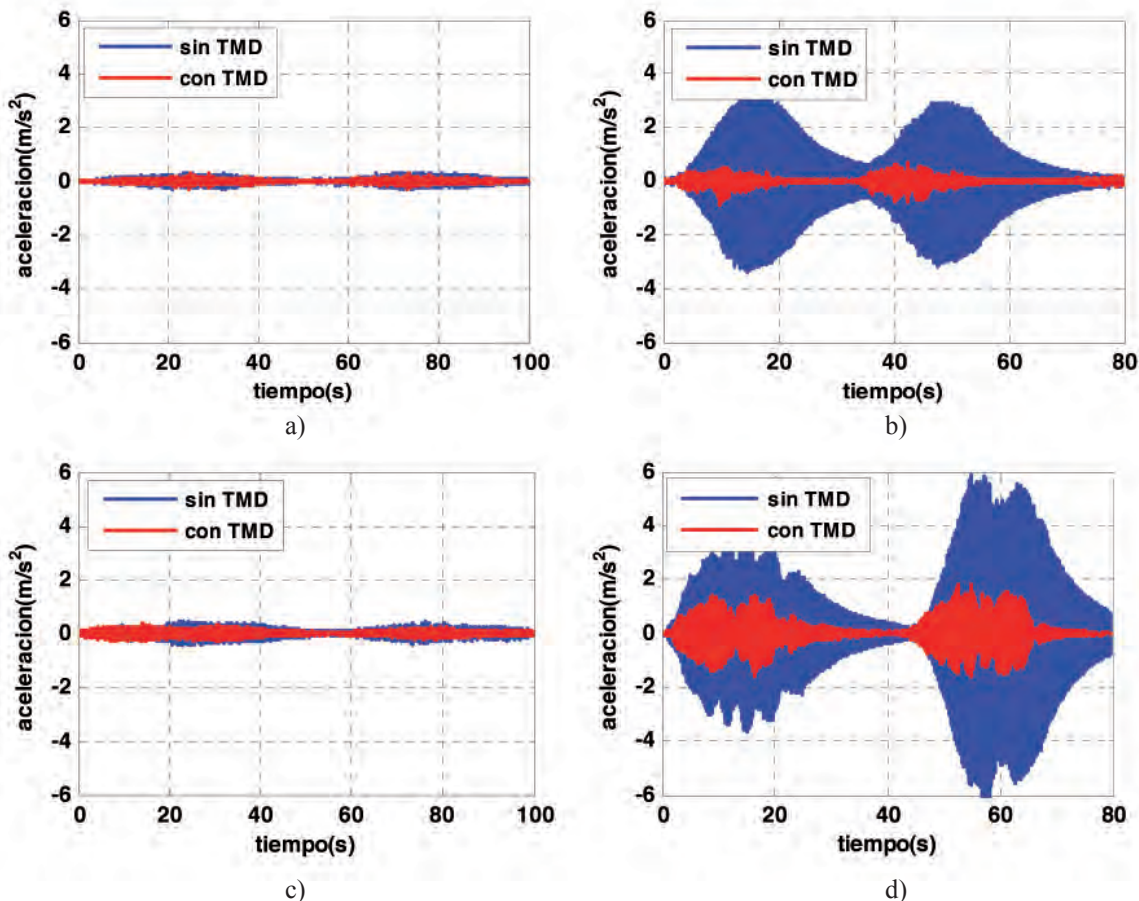


Fig. 11: Pruebas de análisis del estado de servicio del vano 2. Una persona: a) andando a 1.75 Hz, b) corriendo a 3.5 Hz, y un grupo de cuatro personas: c) andando a 1.75 Hz, d) corriendo a 3.5 Hz



### 4.5 PRUEBAS DE ESTADO DE SERVICIO EN EL VANO 2 DE LA PMC

Por último, se realizaron varios ensayos para cuantificar el desempeño de los sistemas pasivo y activo diseñados. Para ello se analizaron varios estados de carga en los que un peatón y un conjunto de cuatro peatones sincronizaba, con ayuda de un metrónomo, su frecuencia de paso a la primera frecuencia de flexión del vano, la cual es la única que está dentro del rango crítico de frecuencias. De esta forma, se realizaron ensayos tanto con los peatones corriendo a la frecuencia de 3.5 Hz, como andando a la mitad de la frecuencia (1.75 Hz). En este último caso el objetivo de la prueba fue el de evaluar el efecto del segundo armónico de la excitación en la respuesta del vano. En ambas pruebas los peatones realizaban un recorrido de ida y vuelta por el vano en estudio.

En la Fig. 11 se muestran los registros temporales de aceleración vertical en el centro del vano 2 obtenidos en las pruebas con y sin TMD. Este conjunto de pruebas concuerda con los modelos de carga DLM1 (un solo peatón) y DLM2 (un grupo de peatones) definidos en el Eurocódigo 1. En la Fig. 11d. se puede observar la dificultad que tienen cuatro personas para coordinar el paso a la frecuencia de resonancia una vez que el vano tiene un nivel de aceleración notable, y es por ello que no se ha obtenido el mismo nivel de aceleración a la ida que a la vuelta en el caso de la pasarela sin el TMD.

Por último en la Fig. 12 se comparan los valores de aceleración máxima obtenidos en todas las pruebas con los límites de confort propuestos en algunas de las normativas indicadas en la Tabla 1.

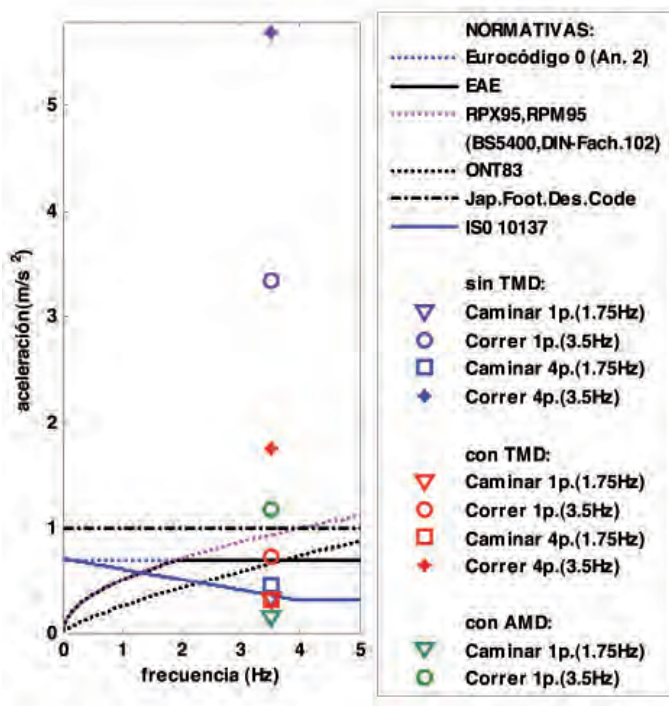


Fig. 12: Verificación del estado de servicio del vano 2 de la pasarela con y sin sistemas de absorción de vibraciones.

Analizando los resultados mostrados en la Fig. 12 para el caso de un peatón, se observa que el vano 2 de la PMC, previo a la implementación de los sistemas de absorción de vibraciones, tiene valores de aceleración máximos muy por encima de la normativa española (EAE) cuando un peatón corre a la frecuencia del primer modo de flexión (3.5 Hz). Una vez que se implementan los sistemas pasivo y activo el valor de aceleración máximo se reduce significativamente. Así, en el caso del TMD se obtiene un valor que cumple críticamente con la normativa española (EAE) y con el eurocódigo empleando el modelo de carga DLM1. Por otro lado el sistema activo consigue menos reducción debido en parte a su menor valor de masa inercial, 30 Kg. frente a los 185 Kg. del sistema pasivo.

Para el caso de cuatro personas corriendo sincronizadas a la frecuencia de resonancia (3.5Hz), el cual puede asemejarse al modelo de carga DLM2 del eurocódigo, se han obtenido niveles de aceleración de la estructura sin control muy por encima de los valores recomendados en la normativa. Con el TMD se ha conseguido una reducción del 70% en el nivel de aceleración, pero no ha sido suficiente para cumplir la normativa.

Para mejorar los resultados obtenidos sería necesario incrementar la masa en el caso del TMD, y optimizar la ley de control y/o aumentar la masa en el caso del sistema activo. En la Fig.12 también se observa que el sistema activo trabaja mejor que el pasivo cuando el nivel de vibraciones es bajo (prueba andando a 1.75 Hz) y que necesita menor valor de masa inercial para conseguir las mismas reducciones que el sistema pasivo. Frente a esto, el sistema pasivo tiene como principal ventaja sobre el activo el ser constructivamente sencillo y tener un mantenimiento mínimo.

### 5. CONCLUSIONES

Las normativas en vigor tratan de solucionar el problema de las vibraciones en pasarelas peatonales dando recomendaciones en forma de rangos de frecuencia que deben ser evitados por las frecuencias naturales de las pasarelas, y valores máximos de aceleración que aseguren el estado de servicio de la pasarela. Debido a la propia naturaleza de los diseños, alejar los modos de la estructura de los rangos críticos de frecuencia supone grandes modificaciones en la rigidez y masa de las estructuras, lo cual en general es complejo y costoso, por lo que en la práctica la solución más efectiva para cumplir los límites de confort exigidos por las normativas es el aumento del amortiguamiento de la estructura por medio de absorbentes de vibraciones de diferentes tipos. En el presente artículo se ha mostrado de forma práctica, con un ejemplo concreto, que la solución para evaluar y controlar las vibraciones en pasarelas peatonales no es excesivamente compleja, pero necesita del conocimiento de varias técnicas y herramientas para afrontar adecuadamente el problema.



## 6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado con la financiación aportada por el Programa de apoyo a proyectos de Investigación de la Junta de Castilla y León (VA019A07) y el Programa de ayudas a la realización de proyectos de investigación, desarrollo e innovación tecnológica en el marco del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2004-2007, correspondientes al Área de Transportes y Construcción, del Ministerio de Fomento (C16/2006). Asimismo, el autor Iván Muñoz Díaz agradece la ayuda económica recibida por la Universidad de Castilla-La Mancha dentro del Programa de Becas para Estancias en otras Universidades o Centros de Investigación.

Los autores agradecen al personal de Museo de la Ciencia de Valladolid su apoyo en las pruebas de campo.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- APS Dynamics. *Instruction Manual: Electro-seis, model 400 shaker*
- Casado CM, Poncela AV, Lorenzana A. "Adaptive tuned mass damper for the construction of concrete pier" *Structural Engineering International*. 2007. Vol. 17-3 p.252-255
- Connor, JJ. *Introduction to structural motion control*. 1ª edición. New Jersey: MIT-Prentice Hall, 2003. 680p. ISBN: 0-13-009138-3
- Dallard P, Fitzpatrick AJ, Flint A et al. "The London Millennium Footbridge", *The Structural Engineer*. 2001. Vol.79-22 p.17-33
- de Sebastián J, Casado CM, Lorenzana A, Poncela AV. "Sistemas de control de vibraciones para grúas torre". *Dyna Ingeniería e Industria*. 2009. Vol. 84 p.237-244
- Díaz IM, Reynolds P. "Acceleration Feedback Control of Human-induced Floor Vibrations", *Engineering Structures*. 2010 Vol. 32 p.163-173
- Dyna, "La nueva pasarela de Abandoibarra". *Dyna Ingeniería e Industria*. 1997. Vol.72-6 p.15-17
- EAE. *Instrucción de Acero Estructural*. Madrid: Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Fomento, Mayo 2010. 447p.
- FIB. *Bulletin 32: Guidelines for the design of footbridges*. Lausanne: Fédération internationale du béton (FIB), 2005. 154p. ISBN 1-88394-072-X
- Fitzpatrick T. *Linking London: The Millennium Bridge*. London: The Royal Academy of Engineering, 2001. 28p. ISBN: 1-871634-99-7
- Gómez M. "A new and unusual cable-stayed footbridge at Valladolid (Spain)". En: *Proceedings of Steelbridge 2004: Symposium international sur les Ponts Métalliques, (Millau, 23-25 June 2004)*, 2004
- Hernández-Vázquez J. "Estructuras y efectos dinámicos del viento". *DYNA Ingeniería e Industria*. 2005. Vol.80-2 p.9-12
- Hivoss. *Design of Footbridges. Guideline. Human Induced Vibrations of Steel Structure (Hivoss-RFS2-CT-2007-00033)*, 2008. 31p.
- IAP. *Instrucción sobre acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera*. 3ª reimpresión. Madrid: Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Fomento, 2003. 79p. ISBN: 84-498-0348-9
- ISO 2631-1:1997, *Mechanical vibration and shock- Evaluation of human exposure to whole-body vibration- part1: General requirements*. 2ª edición Genève: International Organization for Standardization, 1997. 31p.
- Ladret P, González A. "Pretensado exterior en la pasarela del museo de la ciencia en Valladolid". *Informes de la Construcción*. 2005. Vol.57-497 p.5-11
- Ministerio de Fomento. *Recomendaciones para la realización de pruebas de carga de recepción en puentes de carretera*. Madrid: Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Fomento, 1999. 21p. ISBN: 84-498-0425-6
- Poncela A, Casado C, Baeyens E, Peran JR. "Design of Devices for Protecting Civil Structures using Fixed-Order  $H_v$  Control". *Journal of Structural Control & Health Monitoring*. 2007. Vol.14-2 p.239-260
- RPM-95. *Recomendaciones para el proyecto de puentes metálicos para carreteras*. 2ª reimpresión. Madrid: Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Fomento, 2003. 214p. ISBN: 84-498-0223-7
- RPX-95. *Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras*. 2ª reimpresión. Madrid: Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Fomento, 2003. 257p. ISBN: 84-498-0224-5
- Russell H. "Sway-free footbridge to open at last". *Bridge Design & Engineering*. 2002. Vol.8-26
- Sétra. *Technical guide: Footbridges. Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading*. Paris: Service d'Etudes techniques des routes et autoroutes (Sétra), 2006. 127p.
- Sobrino JA, Pulido MD. "Towards advanced composite material footbridges". *Structural Engineering International*. 2002. Vol.2 p.84-86
- Williams M. "Vibrations of the Millennium Bridge". *SECED Newsletter*. November 2001. p.1-3

# Sistema de manos libres para ayuda de ensamblaje en Aeronáutica



Diego Borro-Yáguez\*  
 Javier Serván-Blanco\*\*  
 Juan Manuel Cordero-Valle\*\*\*  
 Jairo Roberto Sánchez-Tapia\*  
 Fernando Mas-Mórate\*\*  
 Luis Matey-Muñoz\*

Dr. en Ingeniería Informática  
 Ingeniero Industrial  
 Dr. en Ingeniería Informática  
 Dr. en Ingeniería Informática  
 Ingeniero Industrial  
 Dr. Ingeniero Industrial

\* CEIT-TECNUN, Paseo Manuel de Lardizábal, 15 – 20018 San Sebastian. Tfno: +34 943 212800. dborro@ceit.es; lmatey@ceit.es; jrsanchez@ceit.es

\*\* AIRBUS Military, Avenida García Morato, s/n – 41009 Sevilla. Tfno: +34 954 596357. javier.servan@military.airbus.com; fernando.mas@military.airbus.com

\*\*\* UNIVERSIDAD DE SEVILLA, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática. Av. Reina Mercedes, s/n - 41012 Sevilla. Tfno: + 34 954 555946. jmcordero@us.es

Recibido: 31/08/2010 • Aceptado: 15/11/2010

## Hands-free wearable system for helping in assembly tasks in aerospace

### ABSTRACT

- Maintenance operations have a great impact on the safety and life expectancy of any product. This is especially true for certain applications within the aerospace industry, which must pass rigorous security checking procedures. Wearable helping systems can help to reduce costs and working time by guiding workers in some specific and difficult tasks. The purpose of this work is developing a hands-free and wearable guided system that supports and helps workers in assembly and verification tasks within the aeronautic field. The worker is able to request information for the specific task in a non-invasive way and also ask the Team Leader for real-time technical support and assistance. The system developed has been tested in an aeronautic company (Airbus Military) and its implementation in specific assembly tasks assessed. It was found that the proposed system can help workers to make their tasks faster, more accurate and more secure.
- **Keywords:** wearable systems, supporting system, mobile computing, aerospace industry.

### RESUMEN

Las operaciones de mantenimiento tienen un gran impacto en la seguridad y esperanza de vida de cualquier producto, especialmente en ciertas aplicaciones dentro de la industria aeronáutica que tiene que pasar procedimientos muy rigurosos de seguridad. Los sistemas de ayuda llevables (*wearable*) pueden ayudar a reducir costes y tiempo de trabajo guiando a los operarios en tareas difíciles. El propósito de este trabajo es presentar un sistema de guiado de manos libres y llevable para soporte y ayuda de operarios en tareas de ensamblaje y verificación dentro del campo de la aeronáutica. El operario es capaz de pedir información al sistema sobre una tarea específica de un modo no invasivo así como pedir asistencia técnica al líder del equipo. El sistema desarrollado ha sido probado en una compañía aeronáutica (*Airbus Military*) y se ha evaluado su implementación en ciertas tareas de ensamblaje. La conclusión de las pruebas ha sido que el sistema ayuda a los operarios a realizar sus tareas de una manera más rápida, precisa y segura.

**Palabras clave:** sistemas llevables, sistemas de soporte y guiado, computación móvil, industria aeronáutica.

### 1. INTRODUCCIÓN

La concepción de una aeronave o cualquier aero-estructura compleja conlleva la síntesis tanto de diseño funcional como industrial para obtener la definición final del producto y su industrialización en términos de Producto, Proceso y Recursos.

Actualmente, todo este trabajo es llevado a cabo con procedimientos y métodos asistidos por computador que permiten un trabajo de diseño industrial y funcional concurrente con enormes beneficios: el tiempo al mercado se reduce, es posible crear y mantener un diseño virtual (Fig. 1) que garantiza una ejecución real, el coste global es menor, la calidad del producto mejora, etc.



Fig. 1: Diseño Virtual versus Producto Real

Trabajando con el diseño virtual, todos los procesos de ensamblaje pueden ser testeados en su entorno virtual antes de existir físicamente.

De esta forma es posible detectar y corregir problemas industriales y funcionales antes de que ocurran en la realidad con el consecuente ahorro en coste e incremento de la calidad.

A pesar de todo, la diversidad de tareas llevadas a cabo en una planta de ensamblaje aeronáutico y su complejidad, implica el uso (en planta) de gran cantidad de documentación técnica y procedimental. Esta documentación es extraída directamente del Producto Virtual en forma de documentos, ilustraciones y esquemas; y enviada a planta a través de un Sistema de Documentación computarizado.

Actualmente, los operarios consultan esta documentación técnica a través del Sistema de Documentación antes de realizar la tarea. Esta documentación está compuesta de especificaciones técnica de los sub-ensamblajes o partes del ensamblaje, así como también de técnicas, métodos y restricciones del proceso de ensamblado.

La mayor parte de esta documentación es generada por cada aeronave y cambia continuamente con el tiempo y la personalización del producto y sus modificaciones. Estas modificaciones deben ser conocidas por los operarios, por ello el Sistema de Documentación tiene un mecanismo de control que asegura que todas las actualizaciones estén disponibles.

Sin embargo, el problema consiste en la dificultad del manejo de la documentación (en formato papel) en ciertos entornos de trabajo (Fig. 2), como por ejemplo dentro de un ala, donde las tareas de ensamblaje pueden llevar mucho tiempo y el espacio para moverse es muy reducido. Otros inconvenientes son la lectura de documentos (datos precisos como pares de apriete, localización de remaches, etc.) en entornos de poca luminosidad y el uso de las manos para esa lectura.

Una capacidad adicional en entornos estrechos y complicados de acceder es la comunicación visual y oral (compartiendo información textual y gráfica sobre las tareas) entre operarios y el líder del equipo para soporte técnico,



Fig. 2: Modelo real versus modelo virtual

así como funciones de “hombre muerto” que garantizan la seguridad del personal comprobando periódicamente su integridad física.

De esta forma se hace necesario diseñar y desarrollar un sistema que permita un acceso de manos libres a la documentación técnica y compartir documentación técnica entre operarios y líder del equipo para soporte técnico y seguridad. Las posibilidades que ofrecen las nuevas tecnologías de la información (TI) hacen factible este tipo de herramientas de ayuda.

Las TI han sido implementadas de forma satisfactoria en empresas en la mayoría de sus tareas diarias. En particular, el campo de los gráficos por computador y *Realidad Virtual* está firmemente establecido en aplicaciones de gestión del ciclo de vida del producto (*Product Lifecycle Management, PLM*) soportando nuevas formas de diseño 3D y simulaciones que ayudan a los ingenieros a entender mejor qué quieren hacer y cómo pueden lograrlo. Mientras la *Realidad Virtual* se centra en la interfaz persona-computador combinando gráficos interactivos generados por computador con interacción, el objetivo de otra tecnología llamada *Realidad Aumentada* es añadir datos generados por ordenador a imágenes reales.

Esta información añadida puede variar desde texto explicativo hasta objetos tridimensionales mezclados de forma realista con la escena. Dependiendo de la cantidad de objetos virtuales añadidos a la escena real, [1] propone la taxonomía mostrada en la Fig. 3.

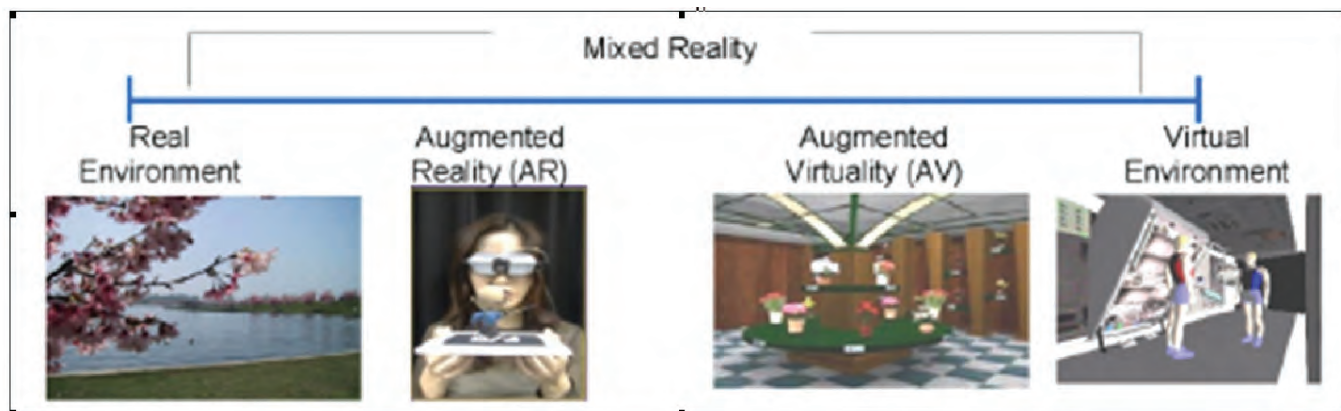


Fig. 3: Taxonomía Milgram



Al contrario que en la realidad virtual, donde se muestra un mundo completamente generado por computador, la realidad aumentada muestra el mundo real aumentado con objetos e información virtuales.

Aunque la realidad virtual está muy establecida en compañías para aplicaciones PLM, la realidad aumentada es una tecnología emergente donde la mayor parte de los resultados son en forma de investigación y sistemas experimentales.

Existen pocos trabajos aplicados al mundo empresarial. Esto es debido a que las soluciones más populares son las basadas en imagen por su bajo coste y no invasivas al entorno (sin cables), pero requieren un alto coste computacional y su precisión es menor a la de los métodos clásicos.

Debido a todo esto, en este trabajo se propone un paso previo a un sistema de realidad aumentada. En lugar de desarrollar un sistema de realidad aumentada que no se llegue a utilizar por operarios debido a su no practicidad en procesos reales, presentamos un sistema de soporte que, haciendo uso de las tecnologías de la información, guíe y ayude a los operarios en sus tareas diarias. El sistema es mínimamente invasivo, de manos libres y *wearable* usando computación móvil.

La validación del sistema ha sido llevada a cabo en la compañía Aeronáutica *Airbus Military*. Al contrario que muchos estudios en la bibliografía con investigaciones muy buenas pero no prácticas en tareas reales del día a día de una empresa, el sistema que proponemos es capaz de integrarse dentro del sistema real de la línea de ensamblaje final de la empresa.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera. La sección 2 presenta una revisión de trabajos relevantes en las tecnologías usadas en este trabajo. En la sección 3 se describe con detalle la arquitectura del sistema desarrollado. Cada uno de los módulos son descritos en las secciones de la 4 a la 7. Los resultados obtenidos y experiencias de *Airbus Military* probando el sistema en planta con tareas reales se presentan en la sección 8. Finalmente, en la sección 9 se revisan las conclusiones derivadas de este trabajo.

## 2. ESTADO DEL ARTE

A diferencia de las soluciones tradicionales de escritorio, la computación móvil y *wearable* permite a los usuarios mantener su atención en el entorno real y no en la interfaz. Un recibimiento positivo de nuevas tecnologías por parte de operarios industriales se consigue únicamente cuando esa tecnología ofrece un valor añadido sin que interfiera en su trabajo diario.

Los primeros prototipos de aplicaciones basadas en realidad aumentada móvil usaban *Head Mounted Display (HMD)* conectados a portátiles cargados en la espalda del usuario [2, 3, 4]. Sin embargo, este tipo de dispositivos pesados y aparatosos no alcanzan los requerimientos de un sistema de realidad aumentada que debería ser confortable.

La alternativa es el uso de dispositivos móviles como *PDA*s o *smartphones*. Existen diversos desarrollos de realidad aumentada usando este tipo de dispositivos con diferentes grados de autonomía del dispositivo móvil, siendo la implementación más común usar el dispositivo móvil como elemento de entrada/salida para visualización e interacción con el usuario y dejando el procesamiento y composición de la imagen aumentada a cargo de un servidor remoto [5, 6]. Esta arquitectura genera un flujo enorme de información entre el cliente y el servidor que a veces no cumple las especificaciones requeridas en ciertas aplicaciones de realidad aumentada. Una arquitectura soportada únicamente por un dispositivo móvil presenta serios problemas de tiempo de procesamiento debido a las limitaciones de hardware. Existen ejemplos documentados usando *PDA*s [7] o teléfonos móviles [8]. Debido a la limitación de hardware de estos dispositivos, algunos trabajos utilizan el concepto de realidad aumentada bajo demanda donde los objetos virtuales son añadidos a una imagen real capturada en un instante dado [9]. Este concepto es contrario al tradicional donde el aumento de información se realiza en cada *frame*.

También se han desarrollado numerosos proyectos internacionales basados en realidad aumentada y computación móvil. Algunos de ellos enfocados a la interacción persona-computador y la usabilidad de la computación *wearable*, como por ejemplo *WearIT@Work* [10] (orientado a la mantenibilidad) y *MADAM* [11] (orientado a aplicaciones móviles adaptativas). Otros trabajos orientan su esfuerzo en la búsqueda de tecnologías que mejoren la accesibilidad de los recursos disponibles (documentos, vídeos, etc.), como *MYCAREVENT* [12], *CASCOM* [13], y *AMIRA* [14]. Aplicaciones que usan una *PDA* como cliente que constantemente demanda imágenes aumentadas por un servidor aparecen en el proyecto *AR-PDA* [15, 16]. Este servidor es el responsable de las tareas asociadas al *tracking* y al renderizado. En algunos proyectos como *SNOW* [17] (orientado a la mantenibilidad) o *ULTRA* [9], se incluyen en las imágenes reales instrucciones de realidad aumentada para mejorar el entendimiento de los contenidos. Proyectos como *ARVIKA* [18] ofrecen servicios de ayuda en productos técnicos complejos usando realidad aumentada con marcadores (Fig. 4).



Fig. 4: Ejemplo de marcadores en ARVIKA

Todos los proyectos y trabajos mencionados anteriormente, aunque están basados en realidad aumentada, han quedado en fase de demostradores de tecnología ya sea por su falta de precisión o por su necesidad de intervenir el entorno con marcadores. En cualquiera de los dos casos no se utilizan en el día a día de la empresa por las razones comentadas. Debido al temprano estado de esta tecnología, este trabajo presenta un sistema previo a la realidad aumentada para asegurar su practicidad y uso real en la empresa.

### 3. ARQUITECTURA Y DISEÑO DEL SISTEMA

La convergencia del ordenador, Internet, las comunicaciones y las tecnologías de la información con técnicas de miniaturización ha colocado a la computación móvil en el umbral de un periodo de crecimiento. Tecnologías emergentes permiten reducir el tamaño, peso y coste de los dispositivos móviles a la vez que se incrementa su capacidad de computación, almacenamiento, pantalla y funcionalidades.

La elección del dispositivo de procesamiento y visualización depende del contexto del trabajador: si el operario trabaja fuera del fuselaje de la aeronave, la información se puede presentar en pantallas de plasma localizadas en estructuras cercanas; pero si el operario se encuentra dentro del fuselaje, la información debería presentarse en algún tipo de dispositivo móvil (PDA, TabletPC, UMPC) o algún dispositivo menos invasivo como un HMD monocular. La Fig. 5 muestra un ejemplo



conceptual de HMD monocular.  
Fig. 5: Diagrama conceptual de un HMD monocular

Aunque existe un amplio rango de opciones para la visualización de datos, la elección es más difícil si se quiere encontrar un sistema interactivo, no invasivo y de manos libres. Actualmente las tecnologías de visión por computador y de reconocimiento de gestos están todavía en fase de investigación y sin la madurez requerida para un sistema robusto. Teniendo en cuenta todo esto, se ha elegido un sistema de interacción basado en reconocimiento de voz para el sistema que se propone. Para hacerlo lo suficientemente robusto, se ha restringido su uso a un número de palabras

clave que el operario usará para pedir servicios al sistema.

Las funcionalidades principales del sistema son: videoconferencia, dispositivo hombre-muerto, interacción vía voz y monitorización de las tareas realizadas.

La arquitectura sigue un modelo cliente-servidor como ilustra la Fig. 6. Para las tareas del servidor (líder del equipo) se usa un PC de bajo coste suficiente para actuar como nodo central de la arquitectura de red al que se conectarán los clientes móviles (operarios) a través de comunicaciones *wireless WLAN*.

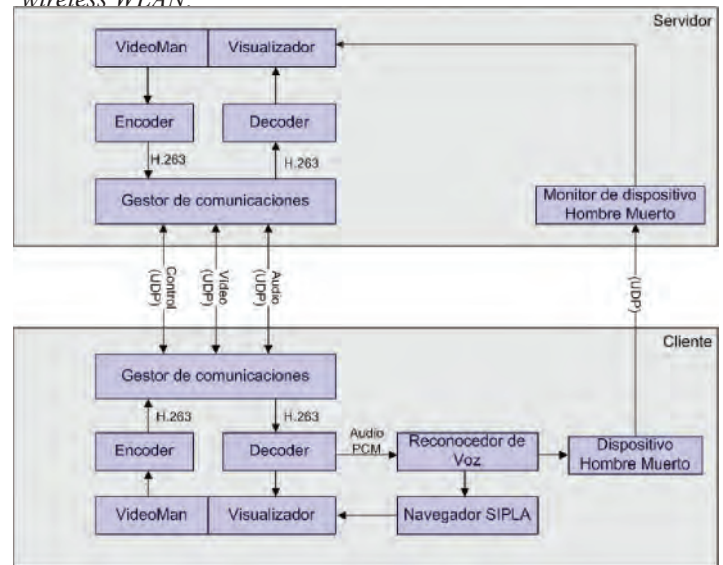


Fig. 6: Arquitectura del sistema

Los módulos software se enumeran a continuación y se describirán con más detalle en las siguientes secciones.

La librería del gestor de cámara (*VideoMan*<sup>1</sup>) es capaz de gestionar cualquier número de cámaras que se conecten al sistema. Usa *Microsoft DirectShow* e imágenes RGB sin compresión como salida. El módulo visualizador muestra imágenes RGB usando *OpenGL*, lo que permite una independencia del dispositivo de visualización (monitor, HMD monocular, etc.). Los módulos de *encoder* y *decoder* comprimen y descomprimen las imágenes (frames del vídeo) para su envío y optimización del ancho de banda de la red. El módulo de reconocimiento de voz procesa los comandos de voz del operario y visualiza la información demandada directamente del Sistema de Documentación de la empresa (esta base de datos recibe el nombre interno de SIPLA). Finalmente, el gestor de comunicaciones es el responsable de la transferencia (protocolos de red, formato de mensajes, etc.) de datos (audio y vídeo).

<sup>1</sup> <http://videomanlib.sourceforge.net/>

#### 4. MÓDULO GESTOR DE CÁMARA

*VideoMan* es una librería LGPL desarrollada por el CEIT (mantenida ahora bajo licencia LGPL por terceras partes) capaz de gestionar múltiples entradas de vídeo (cámaras USB y *Firewire*, *FrameGrabbers*, datos RAW, etc.) usando *Microsoft DirectShow* (Fig. 7). Las imágenes son visualizadas en *OpenGL* como texturas independientes. El uso de esta librería gráfica 3D permite futuros desarrollos de funcionalidades de realidad aumentada en el sistema (adición de objetos 2D y 3D sobre secuencias de vídeo).

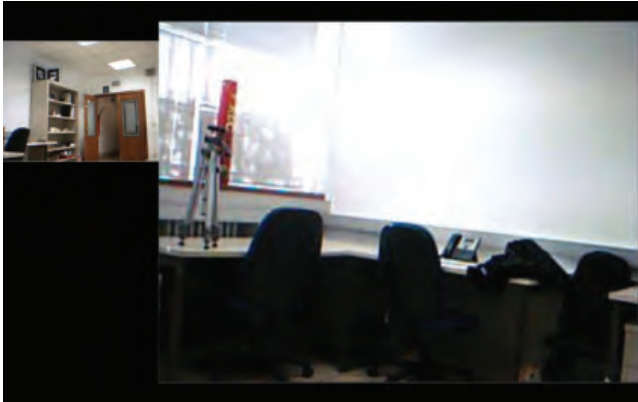


Fig. 7: Librería *VideoMan* trabajando con dos cámaras USB

##### a. Interfaz Gráfica de Usuario

La interfaz gráfica de usuario o GUI (*Graphical User Interface*) ha sido diseñada utilizando el API de las *Windows Forms* de .NET 2.0 (Fig. 8). Las GUI, tanto del cliente como del servidor, son muy similares con la diferencia que el servidor permite visualizar múltiples cámaras (perteneciente a cada operario) simultáneamente. Además, el cliente dispone de un navegador Web integrado controlado por el reconocedor de voz para acceder al Sistema de Documentación de la compañía.

#### 5. MÓDULOS ENCODER/DECODER

Estos módulos son los responsables de comprimir y descomprimir los paquetes de audio y vídeo intercambiados por los nodos del sistema. El formato de los paquetes de vídeo es MPEG4 por su extenso uso en estándares como *DivX* y *XviD*. El audio no se comprime ya que consume muy poco ancho de banda. Para estos módulos se ha utilizado la librería de compresión LGPL *libavcodec*<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> <http://www.ffmpeg.org/>

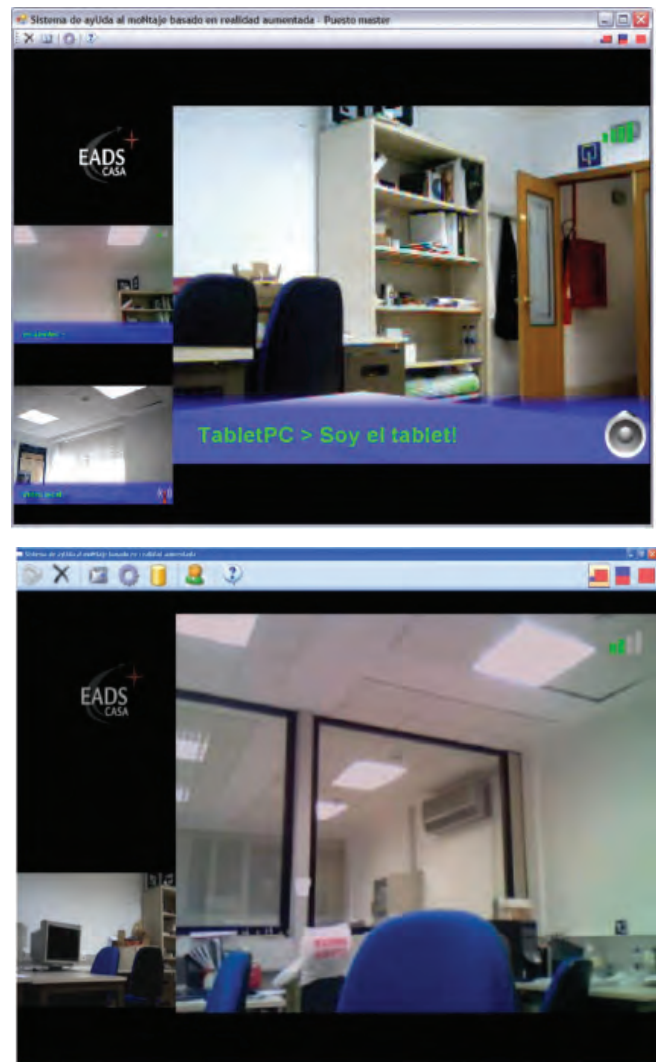


Fig. 8: GUI del servidor (arriba) y del cliente (abajo)

#### 6. MÓDULO DE RECONOCIMIENTO DE VOZ

El módulo de reconocimiento de voz ofrece un fácil acceso al Sistema de Documentación permitiendo al operario navegar a través de una interfaz Web sin necesidad de utilizar las manos.

El sistema analiza ficheros html detectando los links a otras páginas. La navegación se realiza moviéndose secuencialmente, por medio de comandos de voz, a través de los links. Esto es debido a que el Sistema de Documentación de la empresa (Base de Datos SIPLA) está basado en ficheros HTML.

El módulo reconocedor se ha diseñado e implementado basándose en Modelos de *Markov* Ocultos [19]. Este módulo se ejecuta en un proceso separado evitando posibles bloqueos del algoritmo en la aplicación principal. Esta solución permite también tener un reconocedor totalmente desacoplado que puede trabajar en un ordenador diferente al de la interfaz ya que el proceso principal envía el buffer de audio al reconocedor a través de un *socket* TCP.



El reconocedor de voz incluye un módulo de navegación que va traduciendo las órdenes reconocidas en secuencias de instrucciones de teclado, de esa manera por una parte se hace independiente del sistema operativo, y por otra parte se hace muy versátil, flexible y adaptable.

Algunos ejemplos de comandos permitidos o palabras clave utilizadas para navegar por el sistema son: “*página siguiente*”, “*página anterior*”, “*enlace siguiente*”, “*entrar enlace*”, “*ir a página 80 (por ejemplo)*”, etc.

En cuanto al entrenamiento del sistema, se han utilizado grabaciones de usuarios reales tratadas con el software GPL Audacity<sup>3</sup>.

### 7. MÓDULO GESTOR DE COMUNICACIONES

Este modulo utiliza el protocolo UDP para la transferencia de datos. Se establecen tres canales de comunicación: control, audio y vídeo. Además, también se establece un canal TCP para enviar la lista de contactos entre el servidor y los clientes. La arquitectura de red se presenta en la Fig. 9.

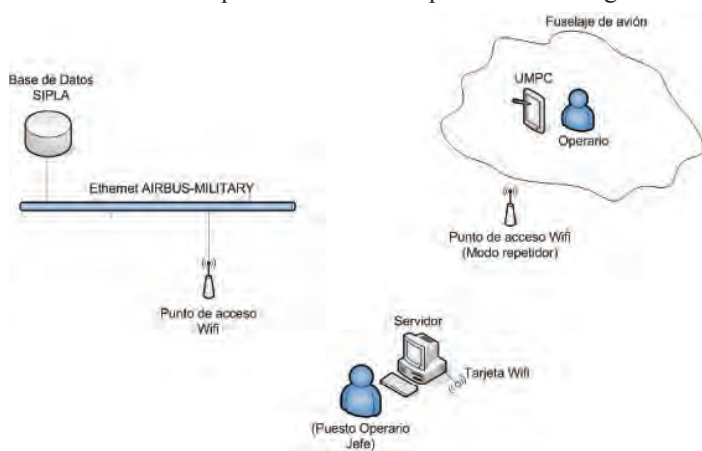


Fig. 9: Arquitectura de red

El canal de control se utiliza para establecer las conexiones entre usuarios. Un paquete de control está compuesto por un identificador y varios parámetros dependientes del tipo de mensaje. Su estructura se puede observar en la Tabla 1.

Msg ID (1 byte)	Param. 1 (1 byte)	'''	Param. n (1 byte)
--------------------	----------------------	-----	----------------------

Tabla 1: Formato del paquete de control

Existen bastantes tipos de mensajes de control, por ejemplo aquellos relacionados con nuevas conexiones/desconexiones, envío de parámetros de cámara (para notificar

el tipo de cámara que se está usando), búsqueda de clientes en la red, etc.

Como se ha comentado previamente, para el envío de la lista de contactos desde el servidor a los clientes se utiliza un canal TCP. Cuando un nuevo cliente se conecta al servidor, este le envía un fichero XML con todos los contactos existentes. De esta manera, el nuevo cliente puede crear videoconferencias con el resto de operarios. La lista de contactos no se almacena de modo local sino que el servidor la envía siempre que un cliente quiera ver dicha lista. De esta forma, un cliente puede enterarse de la conexión de nuevos clientes. La Fig. 10 muestra un ejemplo de lista de contactos.

```
<?xml·version="1.0"?>
<SunContacts>
·<Server·address="192.168.0.1"·
comments="Server"·/>
·<TabletPC·address="192.168.0.100"·
comments="Laptop"·/>
·<Worker01·address="192.168.0.10"·
comments="Station·72"·/>
·<Worker02·address="192.168.0.20"·
comments="Station·70"·/>
</SunContacts>
```

Fig. 10: Fichero XML con la lista de contactos

#### a. Algoritmo de balance de ancho de banda

Se ha desarrollado un algoritmo de balance de ancho de banda que es capaz de detectar de forma automática congestiones en la red de comunicaciones. Si se diera el caso, se prioriza la transmisión de voz frente a la de imagen, garantizando la disponibilidad del canal de comunicación.

El método implementado mide el ancho de banda analizando la tasa de recepción de tramas de audio. Esto se consigue contando las tramas de vídeo que se transmiten entre dos recepciones de audio consecutivas. Si el valor es menor que una cierta tolerancia, se interrumpe la emisión de vídeo hasta que la tasa de recepción de audio vuelva a niveles aceptables. El nivel de tolerancia se establece como  $V_{fp} / A_{fps}$  siendo  $V_{fp}$  la tasa de transmisión de vídeo deseada y  $A_{fps}$  la tasa de transmisión de audio deseada. El ajuste de la tasa de emisión de vídeo se controla de forma dinámica, ajustándose de manera proporcional al retardo en la recepción de las tramas de audio, siendo la cancelación completa de emisión de vídeo el peor de los casos. De esta forma se consigue que el sistema sea capaz de adaptarse a pequeñas fluctuaciones en la disponibilidad del ancho de banda en la red sin llegar a afectar a la comunicación entre los usuarios. Una vez restablecida la tasa normal de recepción de tramas de audio, el sistema comienza a incrementar la tasa de transmisión de tramas de vídeo de forma gradual hasta que se alcanza la capacidad máxima de la red.

<sup>3</sup> <http://audacity.sourceforge.net/>

### b. Dispositivo Hombre Muerto

El dispositivo “hombre muerto” avisa de forma automática al jefe del equipo en el caso de que un trabajador quede incapacitado. Este sistema resulta de especial interés cuando el operario se encuentra trabajando en lugares de difícil acceso, como es el caso del interior del ala.

Este dispositivo funciona en un hilo de ejecución aparte para evitar problemas de bloqueo. Un sintetizador de voz solicita al operario cada cierto tiempo que pronuncie una frase. Si el reconocedor de voz no es capaz de detectar la voz del operario, el dispositivo publica un mensaje de alerta a través de toda la red que es recibido por todas las estaciones conectadas. Esta alerta se emite de forma continuada hasta que el propio operario la cancele de forma manual.

El dispositivo “hombre muerto” es completamente independiente del módulo de comunicaciones. De esta forma funciona incluso cuando el trabajador no esté participando en ninguna conversación (basta con tener la aplicación ejecutándose).

## 8. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para el servidor se ha utilizado un PC de escritorio Compaq nc6400 (Intel®Core™ 2CPU 1,83GHz, 1GB RAM). El dispositivo móvil testeado ha sido un Sony Vaio UMPC con procesador Intel®Core™ CPU 1,33GHz, 1GB RAM, 800x600 de display, y una tarjeta wireless integrada IEEE 802.11b. Para la captura de vídeo se utiliza una Webcam Hercules Deluxe 1.3 Megapixels y un D-Link DWL-7100AP 802.11 a/b/g como punto de acceso.

Aunque en la actualidad los smartphones son cada vez más potentes, sus procesadores están todavía lejos de llegar a la potencia y versatilidad que ofrece el UMPC escogido. Muchos de los procesadores que incluyen los smartphones pueden llegar a trabajar a frecuencias cercanas a las del UMPC, sin embargo, la tasa de instrucciones sigue estando muy por debajo. Este aspecto influye negativamente en la parte de procesamiento gráfico y de reconocimiento de voz, ya que hacen un uso intensivo de las capacidades de cálculo de la CPU.

El sistema ha sido testeado por operarios (Fig. 11) en dos líneas de ensamblado final de *Airbus Military* en Sevilla (A400M, CN235 and C295). Se realizaron dos tipos de experimentos. El primero es un test de rango para comprobar si el área de trabajo se ve cubierta usando un único punto de acceso. El objetivo del segundo tipo de experimentos es ver si existen cortes en las comunicaciones debido a efectos tipo Jaula de Faraday mientras se trabaja en áreas de acceso complejo como el interior de un cajón del ala del A400M (cajón de fibra de carbono, aluminio y titanio). Ambos tipos de experimentos fueron probados en líneas de ensamblado final con resultados muy aceptables teniendo en cuenta el entorno ruidoso que conlleva una planta.



Fig. 11: Probando el sistema en la línea de ensamblado final C295

Los tests consistieron en un conjunto de 18 comandos diferentes. La Tabla 2 resume los experimentos usando el reconocedor de voz. Los valores señalan el porcentaje de aciertos de los comandos por el reconocedor de voz.

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
Aciertos (%)	76.47	76.47	64.71	70.59	70.59

Tabla 2: Resultados del reconocedor de voz

Se puede observar que el porcentaje de aciertos es elevado y se podría aumentar aún más añadiendo sencillos filtros de voz (micrófonos ambientales) para mejorar el rendimiento del sistema en entornos muy ruidosos. Otra mejora consistiría en aumentar el entrenamiento del reconocedor de voz.

En cuanto a la videoconferencia, no se dan datos cuantitativos, ya que se comprobó que el sistema se comportaba de forma correcta sin cortes en las comunicaciones debido a efectos tipo Jaula de Faraday. Se ha comprobado que el sistema cubre con facilidad el área de una estación de montaje de 60x60m permitiendo las comunicaciones en entornos confinados.

Para la compañía y sus operarios, los resultados han sido muy satisfactorios y el rendimiento del sistema elevado teniendo en cuenta que se utiliza equipamiento de bajo coste. Aunque este trabajo es un prototipo conceptual para testear la viabilidad de mejorar los procedimientos internos de la factoría, los experimentos realizados muestran el claro potencial de esta herramienta así como también todas las mejoras que se pueden hacer para lograr una herramienta final realmente integrado en la línea de ensamblado.

## 9. CONCLUSIONES

El sistema ha resultado de gran utilidad para las tareas diarias del operario ahorrando tiempo, mejorando la calidad del trabajo, y asegurando la seguridad del trabajador.

El reconocedor de voz permite un fácil e intuitivo acceso a las instrucciones de ensamblado almacenadas en SIPLA garantizando que la información que se demanda está siempre actualizada.

El diseño de la arquitectura modular permite el uso de diferentes dispositivos (visualización, computación, etc.) ofreciendo la mejor solución en todo momento.

Una ventaja muy importante es que el sistema está totalmente integrado con la red y recursos de la compañía, lo que permite que cualquier operario pueda acceder a las instrucciones de ensamblado en cualquier momento.

Incrementar la productividad de la línea de ensamblado final es un objetivo esencial en un mercado tan competitivo. Una vía para lograrlo es crear herramientas, como el trabajo que se presenta, que permita a los operarios un fácil e intuitivo acceso a la información necesaria así como asegurar la calidad de esa información. Logrando esto último es posible reducir el tiempo de ensamblado y los errores en las tareas. Uno de los retos más importantes de *Airbus Military* es disponer en planta de la información necesaria de un modo sencillo y que no interfiera con el modo de trabajo normal.

## 10. AGRADECIMIENTOS

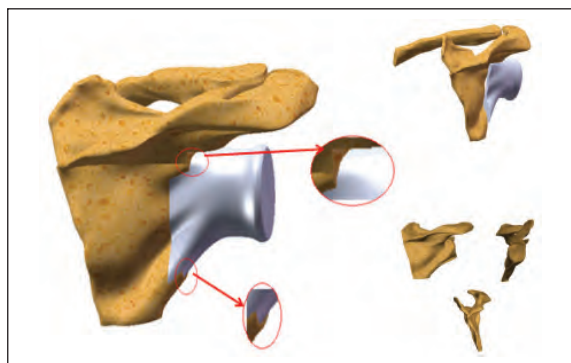
Este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por la *Corporación Tecnológica de Andalucía (CTA)*.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

- Milgram P, Takemura H, Utsumi A, et al. "Augmented Reality: A Class of Displays of the Reality-Virtuality Continuum". En: *SPIE Conference on Telemicroscopy and Telepresence Technologies* (Boston, USA), 1994. P. 282-292.
- Höllerer T, Feiner S, Terauchi T, et al. "Exploring MARS: Developing Indoor and Outdoor User Interfaces to a Mobile Augmented Reality System". *Computer and Graphics*. 1999. Vol. 23-6 p. 779-785.
- Piekarski W, Smith R, Thomas B. (2004). "Designing Backpacks for High Fidelity Mobile Outdoor Augmented Reality". En: *International Symposium on Mixed and Augmented Reality ISMAR04* (Arlington, USA). 2004. P. 280-281.
- Vlahakis V, Ioannidis N, Karigiannis J. "ARCHEOGUIDE: Challenges and Solutions of a Personalised Augmented Reality Guide for Archaeological sites". *Computer Graphics in Art, History and Archaeology, Special Issue of the IEEE Computer Graphics and Applications Magazine*. 2002. Vol. 22-5 p. 52-60.
- Raczynski A, Reimann C, Gussmann P, et al. "Augmented reality @ Siemens: "The Workflow Designer Project" & "Augmented reality PDA"". En: *Augmented Reality Toolkit, The First IEEE International Workshop*. 2002.
- Pasman W, Woodward C. "Implementation of an Augmented Reality System on a PDA". En: *IEEE/ACM Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, 2003. (Tokyo, Japan), P. 276-277.
- Wagner D, Schmalstieg D. "First Steps Towards Handheld Augmented Reality". En: *International Conference on Wearable Computers*, 2003. (White Plains, NY, USA), P. 127-135.
- Möhring M, Lessig C, Bimber O. "Optical Tracking and Video See-through AR on Consumer Cell-Phones". En: *International Symposium in Mixed and Augmented Reality*, 2004. (Arlington, USA), P. 252-253.
- Makri A, Arsenijevic D, Weidenhausen, J, et al. "ULTRA: An Augmented Reality system for handheld platforms, targeting industrial maintenance applications". En: *International Conference on Virtual Systems and Multimedia VSMM*, 2005. (Ghent, Belgium).
- Lawo M, Herzog O, Witt H. "An Industrial Case Study on Wearable Computing Applications". En: *9th ACM International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services (MobileHCI)*, 2007. (Singapore), P. 448-451.
- Alia M, Eide V. S. W., Paspallis N, et al. "A Utility-Based Adaptivity Model for Mobile Applications". En: *IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*, 2007. (Niagara Falls, Ont, USA), P. 556-563.
- Weiss E, Gehlen G, Lukas S, et al. "MYCAREVENT - Vehicular Communication Gateway for Car Maintenance and Remote Diagnosis". En: *IEEE Symposium on Computers and Communications ISCC*, 2006. (Cagliari, Italy), P. 318 - 323.
- Cáceres C, Fernández A, Ossowski S, et al. "Agent-Based Semantic Service Discovery for Healthcare: An Organizational Approach". *IEEE Intelligent Systems*. 2006. Vol. 21-6 p. 11-20.
- Auriol, E. "AMIRA: Advanced Multi-modal Intelligence for Remote Assistance". *Lecture Notes in Computer Science*. 2007. Vol. 4458 p. 51-60.
- Beier D, Billert R, Brüderlin B. "Marker-Less Vision Based Tracking for Mobile Augmented Reality". En: *International Symposium of Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, 2003. (Tokyo, Japan).
- Gausemeier J, Freund J, Matysczok C, et al. «Development of a real time image based object recognition method for mobile AR-devices». En: *ACM SIGGRAPH AFRIGRAPH 2003: 2nd International Conference on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualisation and Interaction in Africa*, 2003. (Cape Town, South Africa), P. 133-139.
- Burmeister R, Pohl C, Bublitz S, et al. "SNOW - A Multimodal Approach for Mobile Maintenance Applications". En: *IEEE International Workshops on Infrastructure for Collaborative Enterprises*, 2006. P. 131-136.
- Wolfgang F. "ARVIKA: Augmented Reality for Development, Production and Service". En: *Proceedings of the 1st International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 2002.
- Becchetti, C., Prina Ricotti, L. "Speech Recognition: Theory and C++ Implementation", Ed.: Wiley. 1999.



# Parametrización de la articulación Gleno-Humeral



Alberto Higuera-Garrido \*  
Pablo Pando-Cerra \*  
Aquilino Osorio-Zapico \*  
Rosa María Verónica López-Vega\*

Dr. Ingeniero Industrial  
Dr. Ingeniero Industrial  
Dr. Ingeniero de Minas  
Ingeniero Industrial

\* Universidad de Oviedo. Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación. Campus de Viesques, 33204 - 33204 Gijón. Tfno: +34 985 181948. higueraalberto@uniovi.es, pandopablo@uniovi.es, aosorio@uniovi.es, verovega@gmail.com

Recibido: 23/08/2010 • Aceptado: 15/11/2010

## Parameterization of the Gleno-Humeral joint

### ABSTRACT

#### • Introduction.

The aim of this project involves the parameterization of the gleno-humeral joint in a fast and simple way and so as to reduce waiting times, irradiation of patients and costs for the different health systems, both public and private. Also the aim involves to provide surgeons and engineers with more efficient tools at the time of diagnosis, surgery and implant design.

#### Material and Methods.

A stereolithographic reconstruction of the joint is processed into a featured model (coatings, extrusions, sweeps, etc.) prior to the parameterization of those features that define the joint. By consulting documentation and expert surgeons, those parameters of interest for the generation of the 3D model are determined and then implemented in the model. Following the parameterization of the model in the mechanical design software application Solidworks® it is necessary to check the results and to validate the model.

#### Results.

An Excel® file is obtained that allows, from a number of data, automatically to generate the reconstruction of the patient's joint in seconds with Solidworks® from which the engineer can make or evaluate the mechanical design of the implant and the surgeon study those parameters of interest. Finally a parametric model of the gleno-humeral joint is obtained which responds correctly to the Excel® sheet that monitors it.

#### Conclusions.

By eight parameters it is possible to satisfactorily characterize the gleno-humeral joint for diagnostic, pre and post-surgical studies.

Varying the values of the parameters in an Excel® sheet anatomy is automatically rebuilt in a 3D mechanical design application (Solidworks®).

Without the time and resource requirements of typical 3D reconstructions significantly satisfactory results are obtained and the obtained parametric model responds correctly to changes in the values of the parameters of government.

- **KEYWORDS:** gleno-humeral joint, custom made implant, parameterization, glenoid fossa, mechanical design, 3D reconstruction.

### RESUMEN

#### Introducción.

El objetivo del presente proyecto consiste en la parametrización de la articulación gleno-humeral de una manera rápida y sencilla que permita reducir los tiempos de espera y la irradiación de los pacientes, así como los costes a los diferentes sistemas sanitarios, tanto públicos como privados.

Igualmente se pretende dotar a cirujanos e ingenieros de herramientas más eficientes a la hora del diagnóstico, cirugía y diseño de implantes.

#### Material y Métodos.

A partir de una reconstrucción estereolitográfica de la articulación se procede a su transformación en modelo de operaciones (recubrimientos, extrusiones, barridos, etc.) previamente a la parametrización de aquellas que definen la articulación.

Mediante la consulta de documentación y el asesoramiento de expertos cirujanos se determinan aquellos parámetros de interés para la generación del modelo 3D y se procede a su implementación en el modelo.

Tras la parametrización del modelo en la aplicación de diseño mecánico Solidworks® se procede a la comprobación de los resultados y a la validación del mismo.

### Resultados.

Se obtiene una hoja Excel® que permite, a partir de un número de datos, generar automáticamente en segundos la reconstrucción de la articulación del paciente en la aplicación *Solidworks*® desde la que el ingeniero puede realizar o valorar el diseño mecánico del implante y el cirujano estudiar aquellos parámetros de interés.

Igualmente se obtiene un modelo paramétrico de la articulación gleno-humeral que responde correctamente a la hoja de Excel® que lo gobierna.

### Conclusiones.

Mediante ocho parámetros es posible caracterizar la articulación gleno-humeral de una manera satisfactoria para estudios diagnósticos, pre y post-quirúrgicos.

Variando los valores de los parámetros en una hoja de Excel® se reconstruye automáticamente la anatomía en una aplicación de diseño mecánico 3D (*Solidworks*®).

Sin los requerimientos de tiempo y recursos de las reconstrucciones 3D habituales se obtienen resultados significativamente satisfactorios y el modelo paramétrico presentado responde correctamente a la variación en los valores de sus parámetros de gobierno.

**Palabras clave:** articulación gleno-humeral, implante a medida, parametrización, glena, diseño mecánico, reconstrucción 3D.

## 1. INTRODUCCIÓN

La cirugía protésica del hombro se inició en los Estados Unidos para tratar las fracturas severas de la articulación gleno-humeral (Ali, et al, 2010). Con los años, este tratamiento se ha utilizado para otros procesos con mayor éxito que las fracturas, como la artrosis primaria (Hatrup, 2009), artrosis post traumática, artrosis por rotura masiva del manguito de los rotadores, artritis reumatoide, necrosis avascular, etc. Desafortunadamente, todos estos procesos conducen a la pérdida del cartilago y al deterioro mecánico de la articulación. El resultado es la aparición de dolor y la rigidez articular. Esto comporta una pérdida de fuerza, una disminución del movimiento de la articulación y el deterioro de la función.

La articulación gleno-humeral (hombro) presenta una mayor complejidad que la articulación femoroacetabular (cadera) si bien mantienen ciertos conceptos comunes (Fig. 1). Ambas consisten en una superficie relativamente cóncava en la que articula una superficie convexa, si bien en el caso del hombro la articulación presenta dos centros de rotación y la superficie convexa (glena) es de menor medida que en la cadera, resultando en una menor coherencia entre glena y cabeza del húmero (Kapandji, 2007).

### 1.1. ARTROPLASTIA TOTAL Y HEMIARTROPLASTIA

La artroplastia total de la articulación gleno-humeral consiste en sustituir las dos partes de la articulación, es decir,

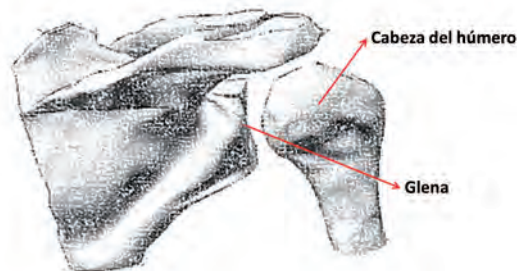


Fig. 1: Articulación gleno-humeral

la cabeza humeral y la glena, por implantes metálicos o plásticos. En cambio, en la hemiartróplasia, sólo se sustituye la cabeza humeral, la glena se reforma o se reconstruye pero no se sustituye.

Dentro de las prótesis totales de la articulación gleno-humeral se pueden establecer diferentes tipos según el grado de congruencia entre la cabeza humeral y la glena: congruentes, semicongruentes e incongruentes.

- Implantes congruentes: su forma es lo más parecida posible a la anatómica. Tienen un componente humeral diseñado para mantener una adecuada fijación e integridad de las inserciones del manguito de los rotadores en el cuello anatómico. Si el manguito de los rotadores se encuentra intacto, no es necesario que el componente de la glena presente una estabilidad intrínseca, pero en general sacrifican la movilidad y potencian la estabilidad aunque a costa de un aumento de las fuerzas de cizallamiento. Fueron los diseños iniciales de prótesis totales. Presentan un gran número de problemas mecánicos: fracturas periarticulares y aflojamientos del componente de la glena.

- Implantes semicongruentes: presentan un mayor recubrimiento del componente humeral con el fin de aumentar la estabilidad articular, y evitar la migración superior del componente humeral por lo que se preserva principalmente para pacientes con disfunción del manguito de los rotadores, siguen presentando grandes sollicitaciones sobre el componente de la glena, por lo que son frecuentes los aflojamientos.

### 1.2. TIPOS DE PRÓTESIS

- Prótesis total de hombro: Consiste en substituir las superficies articulares por una hemiesfera de metal finamente pulida unida a un vástago en el húmero, y por un receptáculo de polímero en la glena de la escápula. Los componentes tienen varios tamaños para adaptarse a las diferentes morfologías de los huesos. Si el hueso es de buena calidad, se puede utilizar un componente humeral sin cemento, pero si el hueso es porótico, este componente humeral se coloca con cemento ortopédico. En la mayoría de los casos, el componente de plástico de la glena, se implanta con cemento ortopédico pero no se

aconseja esta implantación si hay un buen cartilago, existe un gran defecto óseo o un déficit importante de los tendones del manguito rotador. Los pacientes con artrosis del hombro y los tendones del hombro conservados son buenos candidatos para la prótesis total de hombro.

- Prótesis de recubrimiento: Si el paciente posee un cartilago articular conservado, como en el caso de algunas necrosis avasculares, es necesario solamente el recambio de la superficie articular humeral. Para su colocación es necesaria una cirugía más limitada, lo que a veces la convierte en ideal para el tratamiento de la artrosis en los pacientes muy ancianos.
- Prótesis total invertida: Se utiliza tanto en personas que tienen una artrosis severa por rotura completa inveterada del manguito de los rotadores como una prótesis anterior que ha fracasado. Para estos individuos, una prótesis total convencional de la articulación gleno-humeral puede dejarlos todavía con dolor, con serias dificultades y debilidad para mover el brazo verticalmente más allá de un ángulo de 90°. En la prótesis total invertida se cambia la hemiesfera que sustituye la cabeza humeral por una pieza cóncava de polímero colocándose en la zona de la glena hemiesfera metálica. Esto permite que el paciente utilice el músculo deltoides en vez del manguito de los rotadores para levantar el brazo.

Resulta por todo ello evidente que para la colocación de una prótesis se ha de estudiar cada caso en particular, recogiendo:

- La patología específica de cada paciente.
- Las características particulares de la articulación del paciente.

Por todo ello, es de gran utilidad disponer de un modelo tridimensional, adaptado al paciente (Liverneaux, et al, 2009), para estudiar el posicionamiento de la prótesis.

En la actualidad existen una serie de métodos para el estudio de la articulación gleno-humeral. La mayoría de éstos se basan en la apreciación que el cirujano realiza de imágenes radiológicas bidimensionales con sus consecuentes ventajas e inconvenientes.

### 1.3. ESTUDIO MEDIANTE RADIOGRAFÍAS

La radiografía es la técnica de diagnóstico por imágenes más usada en la actualidad, gracias, en gran parte, a su bajo coste económico comparada con otras técnicas de imagen médica.

El estudio mediante radiografías presenta una serie de inconvenientes:

- Es un estudio en dos dimensiones (2D), de modo que se dificulta la labor de la toma de medidas. Del mismo modo, se hace más complicado hacer una valoración precisa de la morfología de la articulación, generando incertidumbre en la elección del implante.

- La tendencia diagnóstica se dirige a la reducción de la irradiación del paciente, por ello estas pruebas se limitan en la medida de lo posible. Al ser una radiación acumulativa no es conveniente la continua exposición del paciente.
- Puede producir malformaciones en el feto, sobre todo en los primeros meses de embarazo.

### 1.4. TOMOGRAFÍA AXIAL COMPUTARIZADA

La Tomografía Axial Computarizada (TAC) es una técnica de diagnóstico ampliamente utilizada en medicina (Friedman, et al, 1992). Es una variante de la radiografía y se basa en la toma de imágenes radiográficas alrededor de una zona del cuerpo de forma que, mediante la unión e interpretación de los datos obtenidos, se obtiene un corte de la zona a explorar.

Los principales inconvenientes que presenta este método son:

- Relativamente elevado coste económico de la exploración TAC.
- Es necesario un número elevado de cortes tomográficos para obtener una reconstrucción tridimensional precisa, lo que implica exponer al paciente a una considerable dosis de radiación.

## 2. SISTEMAS DE RECONSTRUCCIÓN TOTAL

El uso de técnicas de reconstrucción tridimensional a partir de imagen médica permite, entre otros, la lectura de estudios TAC y su interpretación espacial, obteniendo un modelo 3D de la estructura objeto de estudio (Fig. 2).

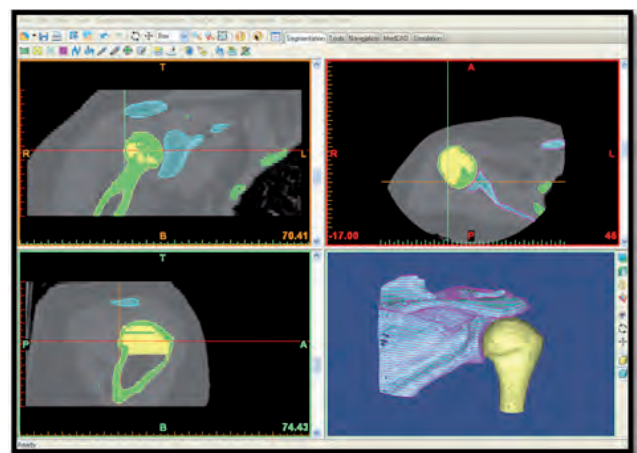


Fig. 2: Reconstrucción de la articulación gleno-humeral mediante el software Mimics®.

Los inconvenientes de esta técnica de reconstrucción 3D consisten en:

- Dificultad en el aislamiento de estructuras óseas y tejidos en aquellos casos catastróficos con presencia de pequeños fragmentos óseos o anatomías con elevada degeneración funcional y morfológica.



- Necesidad de un elevado número de secciones (irradiación del paciente) para obtener reconstrucciones fidedignas de la articulación.

Es por todo esto que el desarrollo de una aplicación que permita la reconstrucción de la articulación gleno-humeral, a partir de una reducida cantidad de datos paramétricos, se presenta como una importante ventaja a la hora de valorar la estabilidad y funcionalidad de la articulación, así como la idoneidad de un tipo y tamaño de implante concreto.

Para determinar aquellos parámetros que determinan las características de la articulación se procede a la documentación y consulta con expertos cirujanos de la Unidad de Hombro del Hospital de Cabueñes en Gijón.

Las relaciones entre el tamaño, la inclinación y la retroversión de la glena son importantes para entender cuando un cirujano prepara la reconstrucción de la glena durante una artroplastia total de hombro. El conocimiento de estos valores y su variación ayudan a reproducir un resultado más anatómico (Churchill, et al, 2001).

La geometría modificada se caracteriza por parámetros como el radio de la cabeza del húmero y la orientación glenoidea (De Leest, et al, 1996). El efecto de un cambio en los parámetros en la fuerza muscular ejercida era pequeña en comparación con la fuerza máxima de un músculo. Sin embargo, en relación con la fuerza de referencia inicial en el músculo, los cambios que tuvieron lugar fueron de un promedio del 50%. Aquellos parámetros relacionados con la retroversión resultaron especialmente importantes, ya que se pueden ocasionar cambios en la fuerza de hasta 300%. Es por ello que la retroversión será uno de los principales parámetros determinantes en la reconstrucción de la articulación.

Así mismo, la inclinación de la glena se ha asociado con la patología del manguito rotador, determinándose que un aumento en la inclinación de la glena puede causar la migración superior de la cabeza del húmero, lo que puede producir la compresión del tendón del supraespinoso (Flieg, et al, 2008).

En los hombros con inestabilidad multidireccional, la traslación de la cabeza del húmero en la glena se incrementa en el rango medio debido a las siguientes tres razones: el aumento de retroversión, un borde posteroinferior hipoplásico y la disminución de la abducción de la escápula durante la elevación del brazo. También se constata que la estabilidad varía en función de la inclinación anatómica de la articulación (Kikuchi, et al, 2008).

### 3. MATERIAL Y MÉTODOS

Mediante sistemas comerciales de reconstrucción 3D basada en imagen médica se crea un modelo genérico en un formato neutro de intercambio de ficheros (Fig. 3).



Fig. 3: Reconstrucción 3D en formato stl

La reconstrucción de la anatomía mediante esta técnica implica un alto coste en recursos y tiempo, requiriendo diversos y complejos procesos en los que el factor humano participa activamente en la interpretación de datos

Para la generación del modelo paramétrico se importa la estructura a la aplicación de diseño mecánico 3D Solidworks®, este proceso se realiza mediante la creación de curvas a partir del modelo en formato neutro (Fig. 4).

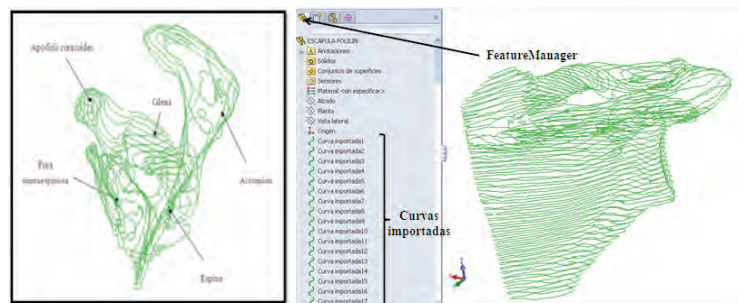


Fig. 4: Curvas obtenidas a partir del modelo stl

Las referidas curvas son tratadas y utilizadas como perfiles de superficies para el modelo 3D que permitirá la generación del modelo paramétrico (Fig. 5).

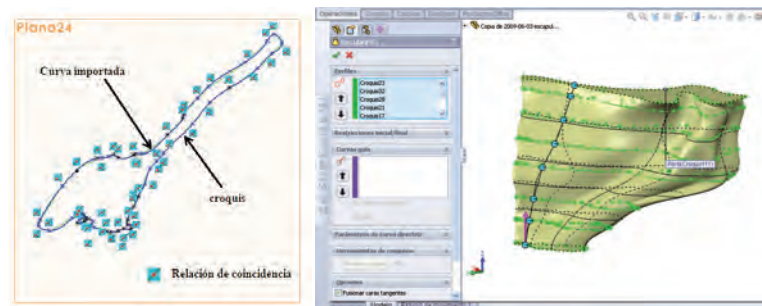


Fig. 5: Conversión de curvas a croquis

De esta manera se obtiene un modelo 3D de la articulación no paramétrico pero generado a partir de operaciones (recubrimiento, extrusión, etc.) de uso habitual en software de diseño mecánico (Fig. 6).



Fig. 6: Modelo stl (izda.) y modelo de operaciones (dcha.)

Obtenido el modelo en la aplicación Solidworks® se procede a implementar en el modelo aquellos parámetros que se considera que definen la articulación, como los ángulos de inclinación, torsión y retroversión de la glena (Fig. 7).

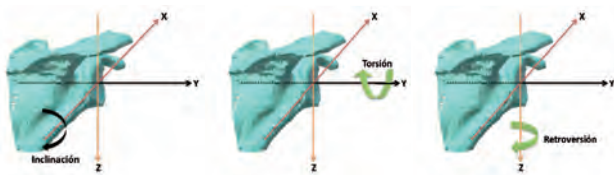


Fig. 7: Ángulos de inclinación, torsión y retroversión

Por su similitud con una forma elipsoidal, la glena se parametriza mediante sus diámetros mayor ( $D_g$ ) y menor ( $d_g$ ) como se aprecia en la Fig. 8.

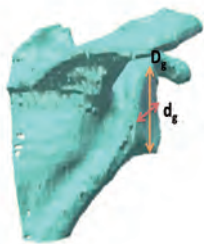


Fig. 8: Diámetros de la glena

La cabeza del húmero se parametriza mediante el diámetro de una esfera con la misma medida que la del paciente, mientras que el posicionamiento del húmero respecto a la glena se parametriza con las distancia entre los centros de

rotación y la distancia libre entre la cabeza humeral y el acromion.

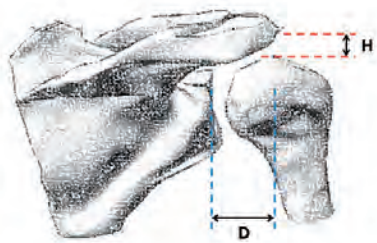


Fig. 9: Distancia entre centros de rotación y libre al acromion

Con los parámetros definidos se procede a crear los ejes y planos que gobiernan el modelo paramétrico (Fig. 10) y permiten su posicionamiento respecto a un sistema de coordenadas fijo en el paciente (Fig. 11).

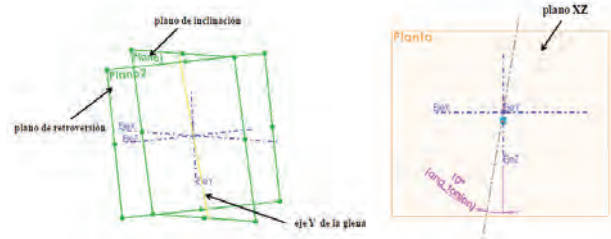


Fig. 10: Planos (izda.) y parametrización de ángulo de torsión (dcha.)

Para que el sistema de referencia creado en la glena sea orientable, han de introducirse una serie de parámetros en una tabla de diseño. En concreto, han de introducirse aquellos a partir de los cuales se fueron obteniendo los distintos planos y ejes que definen la orientación de la glena.

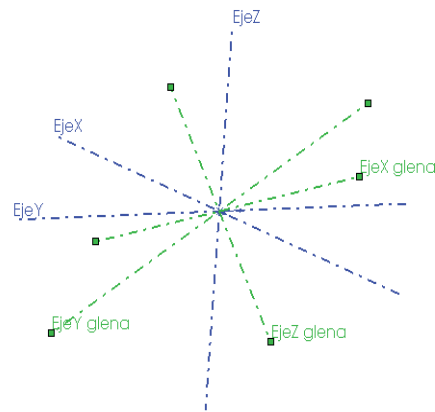


Fig. 11: Sistema de referencia del paciente (azul) y de posicionamiento de la glena (verde)

De una manera análoga se parametriza la glena mediante los dos diámetros que la definen (Fig. 12).



Fig. 12: Parametrización de los diámetros de la glena

Según se van generando los parámetros de control, se van incluyendo en una tabla de diseño, cuya modificación se transmite instantáneamente al modelo 3D paramétrico de la articulación. La tabla de diseño se realiza sobre Excel® (Fig. 13) siendo su manejo sencillo y facilitando de esta manera su uso por personal de diversos perfiles. La implementación del control paramétrico de la aplicación de diseño mecánico 3D

mediante una hoja de cálculo Excel® es una característica de la propia aplicación, automatizando ésta la lectura de medidas contenidas en las celdas de la hoja. Dichas celdas se corresponden con los nombres de los parámetros establecidos en la aplicación de diseño y ésta lee sus valores de ellas.

Tabla de diseño para: tiredro_ elipse	
arg_inclinacion@Croquis3	
arg_retro@Croquis4	
arg_torsion@Croquis5	
dim_mayor@Croquis14	34
dim_menor@Croquis14	26
nuevos parámetros	

Fig. 13: Tabla de Excel® que gobierna el modelo paramétrico

Con las operaciones ya definidas mediante un número limitado de valores, se procede a transformar el modelo no paramétrico importado a Solidworks® en un modelo parametrizado (Fig. 14).



Fig. 14: Transformación del modelo no paramétrico (izda.) en paramétrico (centro y dcha.)

Con la inserción parametrizada del húmero en el modelo, se finaliza la fase de reconstrucción de la articulación.

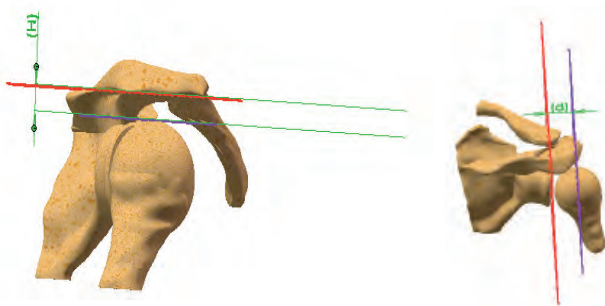


Fig. 15: Inserción paramétrica del húmero

#### 4. RESULTADOS

Se obtiene un modelo paramétrico que responde a diferentes ángulos en los 3 ejes de la glena gobernado por una hoja Excel®, pudiendo modificarse la inclinación (Fig. 16), la retroversión (Fig. 17) y la torsión (Fig. 18).

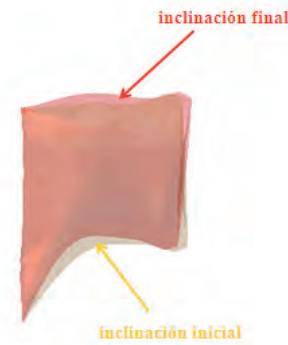


Fig. 16: Modificación de la inclinación de la glena

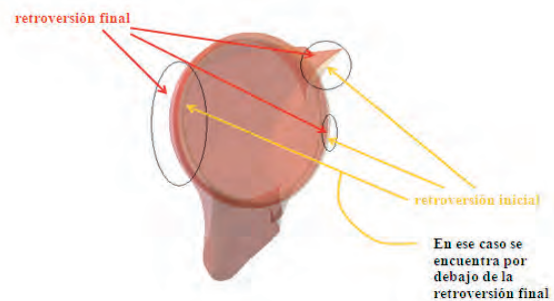


Fig. 17: Modificación de la retroversión de la glena

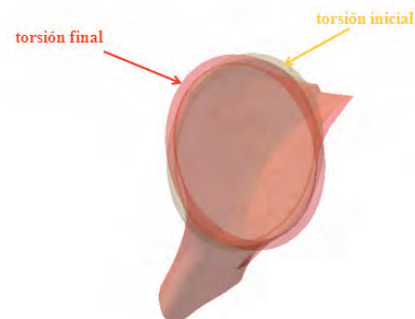


Fig. 18: Modificación de la torsión de la glena

El modelo paramétrico de la articulación también responde correctamente a las variaciones en el tamaño de la glena (Fig. 19).

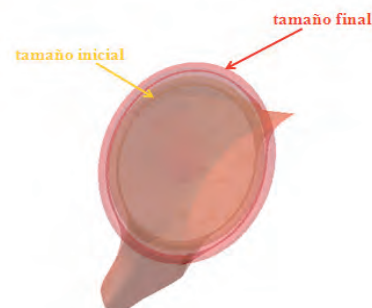


Fig. 19: Modificación del tamaño de la glena



El tamaño de la cabeza del húmero también está controlado correctamente por la hoja de Excel® (Fig. 20).



Fig. 20: Modificación del tamaño de la cabeza humeral

Se realiza la validación en el conjunto comprobando la variación dimensional del modelo en función de los valores asociados a cada parámetro en la hoja de Excel® (Fig. 21).



Fig. 21: Validación del conjunto

## 5. CONCLUSIONES

Mediante ocho parámetros (tres ángulos, dos diámetros de la glena, dos distancias y un diámetro) se caracteriza la articulación gleno-humeral de una manera satisfactoria para estudios diagnósticos, pre y post-quirúrgicos.

Variando los valores de los parámetros en una hoja de Excel® se reconstruye automáticamente la anatomía en una aplicación de diseño mecánico 3D (*Solidworks®*) en escasos instantes.

Sin los requerimientos de tiempo y recursos de las reconstrucciones 3D habituales se obtienen resultados significativamente satisfactorios. La técnica habitual de reconstrucción a partir de imagen médica consiste en la segmentación de las estructuras y su interpretación por personal técnico, realizando las modificaciones y ajustes que éste estime oportunas, para su posterior generación de un modelo 3D de superficies no paramétricas, resultando todo ello en una metodología lenta y consumidora de recursos, mientras que un método paramétrico reduce la reconstrucción a la obtención de las medidas establecidas en un protocolo. Dichas medidas se pueden obtener en tiempo de exploración diagnóstica y exportar a la aplicación que genera la reconstrucción 3D en segundos. El tiempo del proceso se ve de esta manera reducido de horas a minutos.

Es posible el estudio de la idoneidad de un implante u otro en función de los resultados de la reconstrucción, siempre

con menores costes. La capacidad de exportar la anatomía a una aplicación de diseño mecánico facilita la inclusión en el modelo de implantes en 3D, estudiando interferencias, colisiones, tamaños, y todas aquellas variables que se puedan considerar de interés.

El modelo paramétrico presentado responde correctamente a la variación en los valores de sus parámetros de gobierno.

## 6. DISCUSIÓN

El modelo propuesto mejora los tiempos de reconstrucción 3D de la anatomía, si bien, por su propia definición conceptual, representa detalles no relevantes para la anatomía global de la articulación, pero que pueden ser de interés en casos quirúrgicos. Es por ello una aplicación que debe emplearse con cautela en aquellos casos catastróficos o bien ser empleado como una orientación para la reconstrucción articular basada en la anatomía contralateral.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Se agradece la amable colaboración y el interés de los Doctores en Medicina D. José Javier Martínez García y D. Celestino Guerra García, del Hospital de Cabueñes, Gijón. Así como del gerente de *Surg&Medic* D. Jesús de Pedro Suárez que amablemente facilitó el desarrollo de este proyecto.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Ali A, Shahane S, Stanley D. "Total elbow arthroplasty for distal humeral fractures: Indications, surgical approach, technical tips, and outcome". *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. 2010. Vol.19-2 p.53-58
- Churchill RC, Brems JJ, Kotschi H. "Glenoid size, inclination and version: An anatomic study". *Journal of shoulder and Elbow Surgery*. 2001. Vol.10-4 p.327-332.
- De Leest O, Rozing PM, Rozendad LA, Van der Helm FCT. "Influence of glenohumeral prosthesis geometry and placement on shoulder muscle forces". *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. 1995. Vol.4-1 p.S27.
- Flieg NG, Gatti CJ, Doró LC, Langenderfer JE, Carpenter JE, Hughes RE. "A stochastic analysis of glenoid inclination angle and superior migration of the humeral head". *Clinical Biomechanics*. 2008. Vol.23-5 p.554-561.
- Friedman RJ, Hawthorne K B, Genez B M. "The use of tomography in the measurement of glenoid version". *Journal of Bone and Joint Surgery*. 1992. Vol. A74-7 p.1032-1037.
- Hattrup S. "Revision total shoulder arthroplasty for painful humeral head replacement with glenoid arthrosis". *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. 2009. Vol.18-2 p.220-224
- Kapandji AI. *The Physiology of the Joints, Volume 1: Upper Limb*. 6ª edición. Churchill Livingstone, 2007. 372p. ISBN: 978-04-431-0350-6
- Kikuchi K, Itoi E, Yamamoto N, Seki N, Abe H, Minagawa H, Shimada Y. "Scapular inclination and glenohumeral joint stability: A cadaveric study". *Journal of Orthopaedic Science*. 2008. Vol.13-1 p.72-77.
- Liverneaux P, Nectoux E, Taleb C. "The future of robotics in hand surgery". *Chirurgie de la Main*. 2009. Vol.28-5 p.278-285

# Eficiencia de una caldera de biomasa en un centro hospitalario. Aprovechamiento de huesos de aceitunas triturados para producción de calor



Justo García Sanz-Calcedo\*  
Francisco Cuadros-Blázquez\*  
Antonio Ruiz-Celma\*  
Fernando López-Rodríguez\*\*

Dr. Ingeniero Industrial  
Dr. en Ciencias Físicas  
Dr. Ingeniero Industrial  
Dr. Ingeniero Industrial

\* UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA, Avda. Santa Teresa de Jornet, s/n – 06800 Mérida (Badajoz).  
Tfno: +34 924 387068. jgsanz@unex.es; cuadros1@unex.es

\*\*AGENCIA EXTREMEÑA DE ENERGÍA. Avda. Antonio Masa Campos, 26 – 06011 Badajoz.  
Tfno: +34 924 262161. flopezf1@hotmail.com

Recibido: 27/08/2010 • Aceptado: 15/11/2010

## *Efficiency of a biomass boiler in a hospital center. Use of olive crushing stones to produce heat*

### ABSTRACT

- The aim of the present work is evaluating the influence of the operational variables of a renewable energy heating system, specifically biomass-based crushed olive stone, analyzing the feasibility of implementing this type of renewable energy facilities in hospitals and other buildings of Extremadura (Spain), studying how it influence energy and environmental aspects of the building in the energy consumption and management. The analysis has taken account of technical aspects related to the operation of these installations with biomass, including reliability and maintainability of the same, evaluating the problems generated by the introduction of renewable energy from biomass with bones olive crushed in hospitals.
- **Key words:** hospital, biomass, energy efficiency, environmental management.

### RESUMEN

El objetivo de este estudio ha sido evaluar las variables operacionales de una instalación térmica de energía renovable, en concreto biomasa a base de hueso de aceituna triturado, analizando la viabilidad de implantar este tipo de instalaciones de energías renovables en hospitales y otros edificios socio-sanitarios en Extremadura (España), estudiando como influyen los aspectos energéticos y medioambientales del edificio, tanto en el propio consumo energético como en la gestión del mismo.

El análisis ha tenido en cuenta aspectos técnicos relacionados con la explotación de este tipo de instalaciones térmicas alimentadas con biomasa, entre otros la fiabilidad y la mantenibilidad de las mismas, evaluando la problemática que genera la introducción de energías renovables a base de biomasa con huesos de aceituna triturada en edificios de tipo hospitalario.

**Palabras clave:** hospital, biomasa, eficiencia energética, eficiencia medioambiental.

### 1. INTRODUCCIÓN

La instalación de sistemas basados en la generación de energía térmica a base de

biomasa en edificios del sector terciario, es uno de los actuales retos a los que se enfrenta el sector de las energías renovables, que ha despegado en lo referente a captación de energía solar, pero que aún está en fase de desarrollo en España en lo correspondiente a la biomasa [1].

La necesidad de cumplir con el objetivo establecido en la *Directiva Europea 2009/28/CEE*, que marca para España una contribución de las energías renovables de un 20% de la energía primaria en 2020, apuntan a la biomasa como una línea por la cual se debe apostar, ya que la tecnología existente en la conversión energética mediante biomasa asegura el funcionamiento eficiente de las instalaciones [2].

Sin embargo, el desarrollo e implantación de estas tecnologías biomásicas todavía está lejos de ser satisfactorio. En Europa, la contribución de la biomasa en 2008 fue de 68,7 Mtep [3], lo que representa una media aproximada de 0,138 tep/habitante. En España, el consumo de biomasa durante ese mismo año fue de 4,34 Mtep, lo que significa que cada español consumió una media de 0,096 tep; es decir, en España el consumo medio de biomasa por habitante y año, es un 30% menor al que corresponde a la media europea. Una razón puede

ser que una parte de España es semiárida y tiene una elevada irradiancia, por lo que la producción real de biomasa de origen forestal es inferior a la de otros países europeos.

Se hace necesario realizar instalaciones de biomasa que sirvan de demostración de las bondades de esta tecnología, prioritariamente en edificios públicos, que sean visitados frecuentemente por gran cantidad de usuarios. Este es el caso de los hospitales, edificios que funcionan ininterrumpidamente y que son altamente frecuentados.

El principal objetivo en la producción de energía térmica en un centro sanitario es asegurar las condiciones de máximo confort para pacientes y trabajadores, teniendo en cuenta el coste económico, las condiciones de suministro del combustible y el impacto medioambiental del mismo [4]. Además, las medidas para mejorar la eficiencia energética de un hospital deben tener en cuenta las condiciones climáticas y las particularidades locales [5], así como el entorno ambiental interior [6] y la relación coste-eficacia, no debiendo contravenir otros requisitos esenciales aplicables a este tipo de edificios, tales como la accesibilidad, la seguridad en el suministro [7] y la fiabilidad de sus instalaciones.

La utilización de la biomasa como combustible permite alcanzar los anteriores objetivos, posibilitando además, la utilización de una energía renovable de la que se dispone en gran abundancia en Extremadura [8], aprovechando fuentes autóctonas y convirtiendo un residuo en recurso, gracias a su aprovechamiento energético [9]. Sin embargo, la apuesta por la energía renovable obtenida a partir de biomasa [10], con el objetivo de optimizar el gasto energético de las instalaciones y minimizar las emisiones al medioambiente [11], cuenta con pocos antecedentes en centros hospitalarios [12].

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo se presentan los primeros resultados sobre eficiencia energética y viabilidad económica, obtenidos a partir de un sistema de generación de calor alimentado por huesos de aceituna triturados, que sirve para cubrir parte de la demanda térmica del Hospital de Zafra (Badajoz).

Para ello, en primer lugar se efectuó una auditoría energética [13] del hospital efectuada por la *Agencia Extremeña de Energía, AGENEX*, que permitió conocer la situación real en lo relativo a la gestión energética y a las instalaciones, y que se utilizó como base técnica del estudio de viabilidad.

Una vez ejecutada la instalación, para la obtención de los datos relacionados con su operación, se introdujo cada uno de los componentes del sistema, en el plan de mantenimiento preventivo del hospital, asignando un tiempo determinado a cada una de las tareas de mantenimiento. Se cronometró el tiempo diario dedicado a labores de mantenimiento de la caldera de biomasa y de sus instalaciones complementarias, así como el dedicado a la localización y reparación de averías. Además, se monitorizaron los datos relativos al rendimiento global de la instalación, utilizando para ello el sistema de

telegestión de la caldera, monitorizando los parámetros operativos, registrando de forma automática el estado de funcionamiento y el valor de sus parámetros de control.

El proceso de captación de datos se completó con los obtenidos en los archivos históricos del Servicio de *Ingeniería y Mantenimiento* del hospital, mientras que los datos asistenciales se han cotejado con los históricos disponibles en el sistema de información sanitaria del *Servicio Extremeño de Salud*.

Para validar los resultados obtenidos durante el periodo analizado, los valores han sido contrastados mediante una segunda auditoría energética, efectuada por AGENEX. La metodología de captación de datos, se describe en la Fig. 1.



Figura 1: Esquema metodológico de captación de datos

En lo que respecta al análisis del combustible, se actuó de la siguiente manera: una vez recepcionadas y etiquetadas las muestras, se procedió en primer lugar al secado de las muestras, estableciendo el contenido de humedad, mediante el secado en una estufa a 105°C hasta pesada constante. La pérdida de masa de la muestra, expresada en %, es el contenido de humedad, de acuerdo con las normas ASTM D 2016-65 y 871-872.

El análisis de cenizas, se realizó mediante procedimiento de calcinación y determinación del contenido de cenizas, basado en la combustión de la biomasa en un horno de mufla, que se calienta mediante rampas de temperatura hasta alcanzar 815°C, método que deriva de la ASTM D-1102-84. El análisis de volátiles 950°C, se basa en el calentamiento de la biomasa a 950°C en una atmósfera pobre en oxígeno, para lo que se utilizan crisoles con tapaderas. Por otro lado, el carbono fijo se calcula por diferencia al 100% de los contenidos de cenizas a 815°C y de volátiles más humedad.

Se describen a continuación las instalaciones que forman parte del proyecto.

### 2.1. CALDERA

La caldera de biomasa que se ha instalado para calefacción y agua caliente sanitaria, actúa conjuntamente



con las existentes, manteniendo en modo reserva la anterior caldera para entrar en funcionamiento automáticamente de forma redundante en caso de fallo. Se trata del modelo *Bioselect-430* del fabricante *Lasian*, tiene una potencia de 430 kW, es de chapa de acero con tres pasos de humos verticales y sistema de autolimpieza, y trabaja a una presión de servicio de 4 bares. El quemador de biomasa es de tipo modulante en cascada, con encendido automático y sistema empujador de cenizas, incorporándose además, un sistema de recuperación de partículas sólidas mediante la utilización del efecto ciclón. La caldera sustituida, utilizaba como combustible gasóleo, tenía una potencia nominal similar a la instalada.

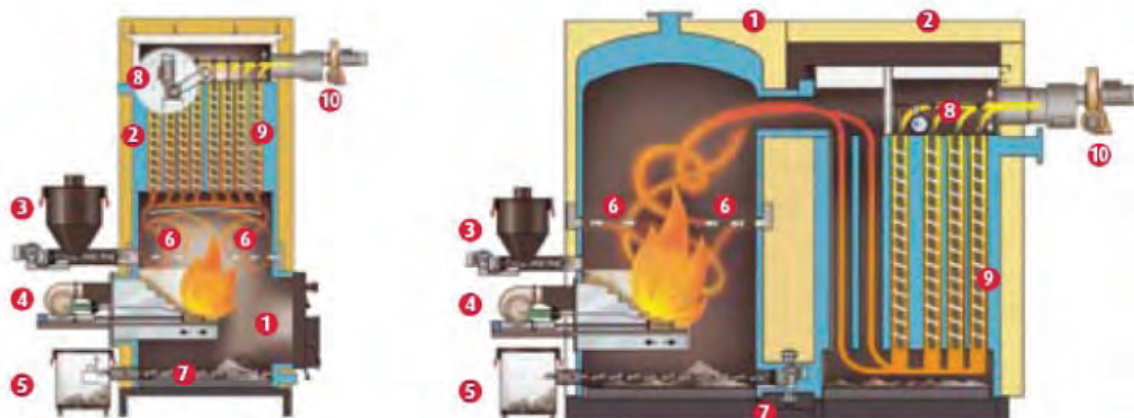
Se utiliza un tornillo sinfín para el transporte del combustible desde el silo de almacenamiento hasta la caldera, en cuya cámara de combustión se introduce el combustible por gravedad y se produce la transferencia de energía en forma de calor al agua del circuito primario. El esquema de funcionamiento de la caldera se puede observar en la Fig. 2.

Para conseguir una mayor eficiencia, regulando la demanda térmica, se ha dispuesto de un depósito de inercia de 2.000 litros, el cual actúa como depósito de calor que evita arranques múltiples del quemador, optimizando el rendimiento del mismo y alargando la vida útil de la instalación [14].

La temperatura de trabajo se ha regulado en 84°C y el horario de funcionamiento se ha establecido de forma in-interrumpida. En la Fig. 3 se puede observar una vista de la central térmica de biomasa.

## 2.2. COMBUSTIBLES

En Extremadura, los tipos de biomasa que se pueden utilizar están condicionados a la disponibilidad del mercado, siendo los más comunes el hueso de aceituna, la poda del olivar y de frutales para hacer astillas, los recortes de madera procedentes de industrias, la cáscara de frutos secos, los residuos forestales [15], los concentrados de la vid [16] y los “*pellets*”.



1. Cámara de combustión. 2. Intercambiador tubos verticales. 3. Silo + Sinfín alimentación. 4. Conjunto quemador: Aire primario Encendido automático Empujador de cenizas. 5. Contenedor de cenizas. 6. Aire secundario. 7. Extractor de cenizas. 8. Sistemas de limpieza intercambiador. 9. Retenedores. 10. Extractor de humos.

Figura 2: Esquema de funcionamiento de una caldera de biomasa seca. Cortesía de Lasian Tecnología del Calor S.L.



Figura 3: Central térmica instalada en el Hospital Comarcal de Zafra (Badajoz)

Para la puesta en marcha de la instalación, se ha procedido a evaluar el coste económico por kilowatio hora relativo al empleo de distintos combustibles, considerando los costes derivados del transporte al punto de suministro, y comparándolos con los costes de combustibles no renovables (gasóleo y gas natural), teniendo en cuenta los precios de mercado (abril 2010) para un consumo equivalente al previsto anualmente en el hospital.

En la Fig. 4 se han representados los costes finales de distintos combustibles expresados en céntimos de euro por unidad de kWh de energía calorífica producida, observándose cómo los combustibles renovables son más económicos [17]. En concreto, el hueso de aceituna es un 20% más económico que el “*pellet*”, un 41% que el gas natural y un 50% que el gasóleo C, todo ello suponiendo que el rendimiento de las

calderas de combustibles sólidos sea inferior en un 6% al resto de calderas [18].

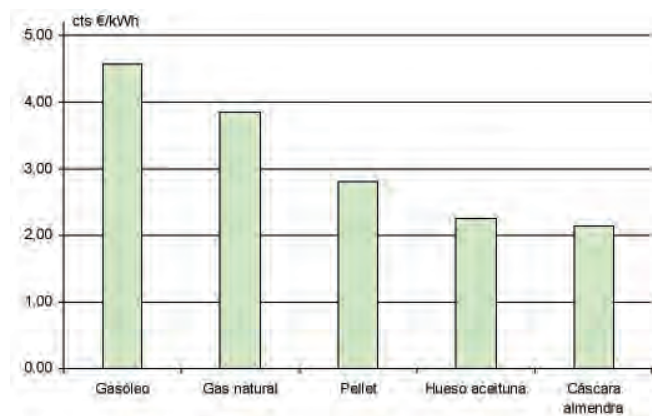


Figura 4: Coste por kWh de energía térmica producida por distintos combustibles

No obstante, el coste de los combustibles de tipo fósil está gravado con elevados impuestos. En concreto, el gasóleo para calefacción incrementa el precio final hasta en un 32,3%. Por otro lado, la biomasa derivada de los recursos agroalimentarios tiene importantes subvenciones derivadas de la política agraria de la Unión Europea. Estos hechos alteran el precio real de comercialización de ambos tipos de combustibles de tal forma que, desde una perspectiva puramente económica, los llega a igualar.

A medio-largo plazo, la tendencia de incremento de costes de producción de los hidrocarburos y sus derivados, claramente al alza, aumentará la diferencia de precio respecto a los biocombustibles, cuyo coste tiende a estabilizarse conforme se consolidan las industrias dedicadas a la transformación de subproductos.

Se decidió utilizar como combustible huesos de aceituna triturados, cuyas características físico-químicas se especifican en la Tabla 1.

Parámetros	Análítica
Tamaño (mm)	< 5
Humedad (%)	7,10
PCI (kWh/kg)	4,872
Cenizas (%)	0,55
Volátiles (%)	74,25
Azufre (%)	0,04
Cloro (%)	0,064
Carbono fijo (%)	19,49

Tabla 1: Análisis de las características físico-químicas del hueso de aceituna

Se trata de un tipo de combustible que procede directamente del proceso de molienda de las aceitunas en las

almazaras, y es un subproducto del proceso de obtención del aceite de oliva. En la extracción del aceite de oliva virgen, se genera un subproducto denominado alpeorajo: restos de piel, pulpa y hueso de la aceituna y agua de vegetación y añadida al proceso. De este producto, las almazaras extraen el hueso de aceituna mediante deshuesadoras en húmedo y lo separan del resto de componentes, reduciendo considerablemente su humedad, que durante los meses de verano se acelera.

El contenido de humedad en el hueso de aceituna asegura el adecuado rendimiento de la instalación y debe oscilar entre el 5% y el 10%. Otro parámetro que debe controlarse es el tamaño del combustible, inferior en todos los casos a 5 mm para garantizar la correcta combustión de todas las partículas, así como su homogeneidad.

La elevada disponibilidad de este tipo de combustible en España, permite disponer durante todo el año del mismo, pues la producción mundial de aceitunas se sitúa en torno a 2.700.000 toneladas de las cuales el 82,5% corresponde a Europa, siendo España el mayor productor mundial con cerca de un tercio de la producción y el 73% de la Unión Europea. Por tanto, el hueso de aceituna es un recurso biomásico renovable, aunque limitado a la producción de la industria básica de la que deriva.

### 3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos durante el desarrollo de este trabajo, se han clasificado en los siguientes apartados: económicos, energéticos, medioambientales y operativos.

#### 3.1. BALANCE ENERGÉTICO

El balance energético de la instalación de biomasa se ha efectuado en base a la demanda histórica de los cinco últimos años, tanto de agua caliente para calefacción como de agua caliente sanitaria. Se ha estimado la demanda energética que debe satisfacer la caldera de biomasa anualmente y se ha supuesto que el rendimiento del sistema de calefacción con biomasa es inferior en un 10% a la anterior caldera de gasóleo [19]. En la Tabla 2 se detallan los parámetros.

Parámetros	Cantidad
Demanda térmica	812.515,5 kWh
Potencia útil	430 kW
Tiempo funcionamiento	1.900 h
Temperatura	84° C
Rendimiento	80 %

Tabla 2: Balance energético de la instalación de biomasa del Hospital de Zafra

En los cálculos sobre la demanda térmica se ha tenido en cuenta que el uso de agua caliente para calefacción se realiza en los meses de octubre a abril, mientras que solo se utiliza la caldera para producir agua caliente sanitaria en los restantes

meses. El consumo anual de huesos de aceituna triturados ha sido de 218 toneladas.

### 3.2. BALANCE MEDIOAMBIENTAL

Las emisiones de dióxido de carbono producidas en la combustión de la biomasa son prácticamente neutras, ya que se parte de la base que la planta vegetal es capaz de retener durante su crecimiento más CO<sub>2</sub> del que se libera en su combustión [20]. En cuanto al resto de contaminantes, las emisiones son tan bajas que se consideran despreciables, por lo que prácticamente las emitidas por el gasóleo coinciden con las evitadas al ser sustituido éste por la biomasa.

Emisiones	Cantidad (kg/año)	Cantidad (g/kWh)
NO <sub>2</sub> (kg)	- 5.852,81	- 5,76
SO <sub>2</sub> (kg)	- 303,537	- 0,29
CO (kg)	- 1.249,17	- 1,23
CO <sub>2</sub> (kg)	- 242.829,6	- 239,01
Partículas (kg)	+ 140,72	+ 0,13
Cenizas (kg)	+3.276,27	+ 3,23

Tabla 3: Balance medioambiental de la instalación de biomasa del Hospital de Zafra

Como se puede observar en la Tabla 3 el cambio de caldera únicamente aumenta la emisión de partículas a la atmósfera, compuestas fundamentalmente por cenizas volantes de carbono, aunque con el término partícula se engloba aquellos constituyentes, a excepción del agua pura, presentes en la atmósfera en estado sólido o líquido, con un tamaño superior al de las moléculas simples e inferior a 100 micras. Aún así, se ha comprobado que el rango de emisión de partículas se encuentra por debajo de los límites admisibles para una instalación de este tipo.

La elevada producción anual de ceniza de la instalación, genera expectativas para una posible valorización de la misma, que en estos momentos está en fase de investigación. Los trabajos efectuados respecto al aprovechamiento de cenizas para su utilización como abono forestal, confirman la moderada capacidad encalante y fertilizante de la misma y sugiere una importante vía de revalorización de este residuo, ya que en la práctica mejora el establecimiento, vigor y estado nutricional de las plantas forestales [21], mejorando significativamente la porosidad del suelo, la capacidad de retención de agua, el pH y los contenidos de P, K, Mg y Ca.

Durante las 7.000 primeras horas de funcionamiento, se han disminuido las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera en 242 toneladas, es decir, el equivalente a la captación anual de 4.850 árboles adultos aproximadamente [22], aunque se ha aumentado la emisión de partículas a la atmósfera en 143Kg.

### 3.3. BALANCE ECONÓMICO

Para analizar la viabilidad económica del proyecto se ha efectuado un análisis comparativo entre la instalación

de gasóleo que estaba en funcionamiento en el hospital y la nueva de biomasa, calculando el coste económico anual de cada combustible, necesario para producir la misma energía térmica.

La inversión ha sido de 177.000 euros, habiéndose obtenido una subvención de la Junta de Extremadura de 51.600 euros a fondo perdido, en base al convenio suscrito con el Instituto para la Diversificación y el Ahorro Energético.

Indicador	Valor
Inversión	177.000 €
Subvención	51.600 €
Coste de la instalación	125.400 €
Ahorro anual combustible	23.131,04 €
Retorno de la inversión	5,4 años
Ahorro vida útil (10 años)	231.310,4 €

Tabla 4: Balance económico de la instalación de biomasa del Hospital de Zafra

Como se puede observar en la Tabla 4 el ahorro global estimado durante la vida útil esperada de la instalación [23], 10 años, es de 231.310 €. Se obtiene, pues, un periodo de retorno de 5,4 años, inferior al producido en otros tipos de instalaciones de producción de energía basadas en captación solar y se ha generado un ahorro económico anual de aproximadamente 23.000 €. Por otro lado, el valor de compra de una cantidad equivalente que la evitada de dióxido de carbono en el mercado de derechos de emisiones, (referencia abril-2010), supondría un ahorro adicional de otros 2.900 € cada año.

### 3.4. BALANCE OPERATIVO

La seguridad y continuidad en el suministro de cualquier central térmica es indispensable para garantizar una calidad de la instalación aceptable. En el caso de hospitales pasan a ser instalaciones críticas en cuanto a los mencionados factores se refiere [24], haciéndose indispensable proceder a un estudio pormenorizado sobre la fiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad de las mismas. Para ello se implementa una función de supervivencia, definida como la probabilidad de que el momento de un fallo sea posterior a un tiempo especificado, y que matemáticamente corresponde a la expresión:

$$R(t) = Pr(T > t) \quad (1)$$

Donde  $R(t)$  es la función de supervivencia,  $t$  es el tiempo,  $T$  es una variable aleatoria que denota el momento del fallo, y  $Pr$  la probabilidad. Para el análisis de la fiabilidad en procesos de duración determinada, se ha utilizado el concepto de tasa de fallo, que se define de la siguiente manera [25]:



$$l(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Pr(t \leq T \leq t + \Delta t \mid T \geq t)}{\Delta t} \quad (2)$$

La tasa de fallo a lo largo del tiempo se define como la probabilidad de fallo de los equipos que permanecen en buen estado durante el tiempo  $t$ , y se representa por  $\lambda(t)$ , según ecuación 3:

$$\lambda(t) = f(t) / R(t) \quad (3)$$

La tasa de fallo interesa de manera particular, puesto que su inversa representa la media de tiempos de buen funcionamiento, al menos cuando  $\lambda(t)$  permanece constante en el tiempo [26]. Su expresión matemática es la siguiente:

$$MTBF = 1 / \lambda(t) \quad (4)$$

Dónde  $MTBF$  es la media de los tiempos de buen funcionamiento de la instalación y  $\lambda(t)$  es la tasa de fallo de la instalación.

Para analizar la evolución en el tiempo de fiabilidad de la instalación de biomasa, parámetro que nos indica la probabilidad de que la instalación esté en estado operativo a lo largo de su vida útil, se ha representado en la Fig. 5 la tasa de fallo en función del número de horas acumuladas de utilización.

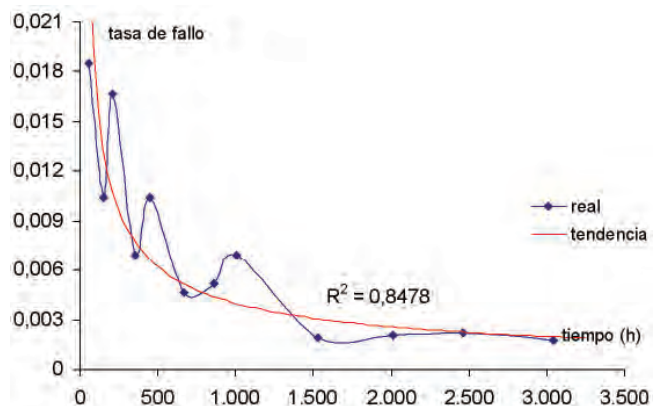


Figura 5: Relación entre la tasa de fallo y el tiempo de funcionamiento

En la Fig. 5 se puede observar como la tasa de fallo de la instalación es muy alta, o lo que es lo mismo la fiabilidad de la instalación en las primeras 500 horas es muy baja. Ello implica que se deben interponer medidas redundantes complementarias que garanticen la continuidad del suministro, mantenido el sistema en permanente observación las siguientes 500 horas. Sin embargo, a partir de las 1.000 horas de funcionamiento, el sistema se estabiliza y evoluciona de forma constante en el tiempo.

Para comprobar si hay una ecuación que relacione los anteriores valores, se han utilizado herramientas informáticas de proceso de datos para determinar y trazar la

curva de regresión que, con una  $R^2$  de 0,8478, responde a la ecuación:

$$y = 0,3244x^{-0,6368} \quad (5)$$

Siendo  $y$  la tasa de fallo esperada de la instalación expresadas en horas<sup>-1</sup> y  $x$  el número real de horas acumuladas de funcionamiento.

El rechazo inicial del personal del hospital, tanto gestores como técnicos de mantenimiento, ha supuesto una barrera para la implantación de esta tecnología. Se han necesitado más tres meses de funcionamiento ininterrumpido de la instalación para vencer los últimos recelos, habiéndose demostrado que ni el proceso de aprovisionamiento, ni el proceso de carga/descarga han supuesto esfuerzos adicionales. Sin embargo, la calibración y la puesta en marcha de la instalación ha conllevado un esfuerzo muy superior a la de una caldera convencional: los continuos ajustes de los parámetros de control, han sido la tónica habitual en los primeros días de funcionamiento.

Se ha comprobado que la tecnología aplicada a las calderas de biomasa, tiene una menor fiabilidad que las calderas de gas natural y de gasóleo, sobre todo en el periodo inicial de funcionamiento de la misma. Es por ello que la disponibilidad de la instalación es inferior, por lo que conviene duplicar las instalaciones y/o disponer de unidades de apoyo con otro combustible. Las tareas de mantenimiento preventivo de la instalación de biomasa han aumentado un 120% respecto a instalaciones similares de producción de energía térmica mediante gasóleo y/o gas natural, debido a operaciones de limpieza, regulación y vaciado del cenicero, suponiendo esto una tarea adicional media de 60 minutos/día.

#### 4. DISCUSIÓN

Se ha demostrado que el elevado consumo de agua caliente sanitaria y de calefacción que anualmente consume un hospital, hace del mismo un edificio ideal para la instalación de sistemas basados en la biomasa, pues su continuo funcionamiento favorece la amortización de las instalaciones.

La presencia permanente de personal de mantenimiento en las salas de calderas de los hospitales permite absorber el mayor tiempo necesario derivado de las operaciones de mantenimientos adicionales a este tipo de instalación, debidas a los procesos de limpieza del hogar y eliminación de cenizas. Es por ello que para la implantación y el desarrollo de este tipo de energías renovables en hospitales, es imprescindible la implicación del personal de mantenimiento y su formación previa.

Se ha observado que, promocionando la utilización de energías renovables mediante biomasa en hospitales, es posible ayudar a crear y consolidar un mercado de biomasa autóctona, incipiente al inicio de éste proyecto y en fase de consolidación en el momento actual, que a medio

plazo conseguirá un aumento económico del medio rural, fomentando su desarrollo y disminuyendo la dependencia externa del abastecimiento de combustibles.

Se ha evidenciado que es necesario mayor espacio para almacenamiento en este tipo de instalaciones y que los rendimientos de las calderas de biomasa son inferiores a los de las calderas convencionales. En cualquier caso, la utilización de la biomasa como fuente de energía tiene que estar basado en estrategias basadas en la sostenibilidad, es decir, consumir como máximo aquello que se produce.

Se ha calculado la inversión necesaria por unidad de energía útil, detectando que para la potencia instalada en el hospital, la inversión inicial necesaria es de 0,0955 €/kWh si se utiliza una instalación de gasóleo o gas natural, mientras que para la instalación de biomasa, tras incorporar subvenciones, es necesario invertir 0,1705 € por cada kWh de energía útil, siendo esta superior inversión, consecuencia del mayor coste de la caldera de biomasa y de los sistemas de almacenamiento. Si se comparan estos ratios con el coste por kWh de energía expresados en la Fig. 4, se puede deducir que aunque el precio final de los biocombustibles es menor que el precio de los combustibles fósiles, en el primer caso es necesaria una inversión inicial del orden de un 78% superior, que se amortiza en función de las horas de funcionamiento de cada instalación, muy elevadas en el caso de hospitales.

Se ha puesto de manifiesto la excelencia del hueso de aceituna triturado con respecto a otros biocombustibles del mercado, debido a su precio, homogeneidad, baja emisión de cenizas, opacidad de los humos y la baja emisión de olores en su almacenamiento y combustión, sirviendo la instalación de biomasa como aula docente abierta que minimice los actuales prejuicios con este tipo de instalación.

## 5. AGRADECIMIENTOS

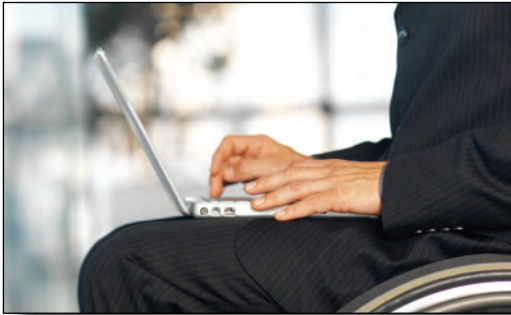
Los autores desean expresar su agradecimiento al Servicio de Ingeniería y Mantenimiento del Área Sanitaria Llerena-Zafra, al Hospital de Zafra y a la Agencia Extremeña de la Energía, por las facilidades mostradas en el desarrollo de éste proyecto, así como al IDAE por su financiación.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- García-Benedicto L. "Instalaciones combinadas de energía solar térmica y biomasa en edificios". *Equipamiento y Servicios Municipales*. Vol. 105. p. 16-25. (2003)
- Idae. *Energía de la Biomasa*. Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía. Madrid. (2007). ISBN: 978-84-96680-15-9
- L'observatoire des Energies Renouvelables "http://www.eurobserv-er.org" [Consulta: 18 de junio de 2010]
- García Sanz-Calcedo J, Garrido S, Pérez C, López F. "Gestión Energética en Servicios de Salud". *Ingeniería Hospitalaria*. Vol. 34, p. 31-38 (2007)
- Huang YL, McLaughlin CP. "Relative efficiency in rural primary health care: an application of data envelopment analysis". *Health Service Research*, 24, p. 143-158 (1989)

- Vargas-Marcos F, Gallego-Pulgarín I. "Calidad Ambiental Interior: Bienestar, Confort y Salud". *Revista Española de Salud Pública*. Vol. 79-2. (2005)
- Shu Yoshida, Koichi Ito, Ryohei Yokohama. "Sensitivity analysis in structure optimization of energy supply systems for a hospital". *Energy Conversion and Management*. Vol. 48, p. 2836-2843 (2007)
- López F et al. *Valoración de la Producción de Biomasa en Extremadura*. Agencia Extremeña de la Energía, 2007. ISBN: 978-84-612-0858-6
- Idae. *Biomasa: Edificios*. Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía. Madrid, 2007. ISBN: 978-84-9666019-4
- Ruiz-Celma A. "Modelización de plantas de biomasa para generación de energía eléctrica". Tesis doctoral, Universidad de Extremadura (2003)
- Rey-Martínez F, Velasco-Gómez E. *Eficiencia energética en edificios. Certificación y Auditorías Energéticas*. Thomson. (2006). ISBN: 978-84-9732419-9
- Suárez-González TV. "Instalación de Biomasa del Hospital del Oriente de Asturias". 16º Congreso Nacional de Hospitales. Cáceres, junio 2009.
- García Sanz-Calcedo J. "Centros de Salud de Alta Eficiencia Energética y Medio-ambiental". 20<sup>th</sup> Congress of the International Federation of Hospital Engineering. Barcelona, octubre 2008
- Thormark C. "A low energy building in a life cycle its embodied energy, energy need for operation and recycling potential". Department of Building Science. Lund Institute of Technology. *Building and Environment*. Vol. 37, Issue 4, p. 429-435 (2002)
- Pérez C, López-Rodríguez F, Ruiz Celma A. "Potencial of Forest Biomass in Extremadura and its Energy Exploitation". National Congress about Renewable Energy. Murcia, 2005
- Rojas S et al. *Potencial energético de residuos concentrados de la vid en Extremadura y Alentejo*. Junta de Extremadura, 1999
- García Sanz-Calcedo J. *Análisis sobre la sensibilidad energética y medioambiental de los parámetros funcionales en los Centros Salud de Extremadura*. Universidad de Extremadura (2009). ISBN: 978-84-692-6740-0
- López-Rodríguez F, García Sanz-Calcedo J, Pérez C, Ruiz A. "Gestión Energética en Centros Sanitarios". *El Médico* Vol. 997. p. 12-18 (2006)
- García Sanz-Calcedo J, Cuadros F, López F. "Análisis sobre la sensibilidad energética de los parámetros de diseño de los Centros Sanitarios". Congreso Científico Internacional de Ingeniería. Tetuán, Marruecos. p. 47-53 (2010). ISBN: 978-84-6930155-5
- Intergovernmental Panel On Climate Change. "The Fourth Assessment Report". Organización Meteorológica Mundial y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2007)
- Omil B, Piñero V, Merino A. "Trace elements in soils and plants in temperate forest plantations subjected to single and multiple applications of mixed wood ash". *Science of the Total Environment*, Vol. 381, p. 157-168. (2007)
- Mota C, Alcaraz-López C, Iglesias M, Martínez-Ballesta 1MC, Carvajal M. *Investigación sobre la absorción de CO<sub>2</sub> por los cultivos más representativos de la región de Murcia*. Departamento de Nutrición Vegetal del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. (2010)
- Sartori I, Hestnes AG. "Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article". Department of Architectural Design, History and Technology, Norwegian University of Science and Technology. *Energy and Buildings*. Vol. 39, Issue 3, p. 249-257 (2007)
- Corretger M. "Incidencia del Mantenimiento en la gestión energética en los edificios". *Ingeniería Hospitalaria* Vol. 39. p. 4-22. (2008)
- Eisner H. *Ingeniería de sistemas y gestión de proyectos*. Asociación Española de Normalización. (2000). ISBN: 84-8143250-4
- Bouchy F. *Le Management de la Maintenance. Évolution et mutation*. Asociación Española de Normalización. (1999). ISBN: 84-8143160-5

# La rotación de puestos de trabajo como medio para la integración de trabajadores con discapacidad



Sabina Asensio-Cuesta  
José Antonio Diego-Mas  
María Carmen González-Cruz

Dra. Ingeniera Informática  
Dr. Ingeniero Industrial  
Dra. Ingeniera Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA. Dpto. de Proyectos de Ingeniería. Camino de Vera, s/n – 46020 Valencia. Tfno: +34 963 877007. sasensio@dpi.upv.es; jodiemas@dpi.upv.es; mcgonzal@dpi.upv.es

Recibido: 20/07/2010 • Aceptado: 11/01/2011

## Job rotation as a method for disabled workers integration

### ABSTRACT

• Job rotation allows workers to vary their tasks and the time employed in each one of them, facilitating the change of the muscular groups used and the progressive incorporation of workers with musculoskeletal disorders. With the job rotation is possible to assign workers to workstations compatible with their limited capacities and to restrict the time that they are exposed to risk factors to which they are especially sensible. This paper presents the application of DPI-ASEPEYO algorithm, to the design of Job Rotation schedules to prevent musculoskeletal disorders and to integrate workers with physical, psychic or communication limitations in environs characterized by high repetitive movements as it happens, for example, in assembly lines.

• **Keywords:** Job rotation; genetic algorithm; musculoskeletal disorders, disabled workers.

### RESUMEN

La Rotación de Puestos de Trabajo permite la variación de las tareas llevadas a cabo por los trabajadores y el tiempo empleado en cada una de ellas, facilitando la alternancia de los grupos musculares utilizados y la incorporación progresiva de trabajadores con problemas músculo-esqueléticos. Con la rotación es posible asignar a los trabajadores limitados a puestos compatibles con sus capacidades y restringir el tiempo que se exponen a factores de riesgo a los que son especialmente sensibles.

Este trabajo presenta la aplicación del algoritmo DPI-ASEPEYO al diseño de agendas de RPT para prevenir los trastornos músculo-esqueléticos e integrar a trabajadores con limitaciones físicas, psíquicas o de comunicación en entornos de trabajo caracterizados por una elevada repetitividad de movimientos, como ocurre, por ejemplo, en las líneas de ensamblaje.

**Palabras clave:** rotación de puestos, algoritmos genéticos, trastornos músculo-esquelético, trabajadores discapacitados.

### 1. INTRODUCCIÓN

Cada vez más, las empresas son conscientes de su responsabilidad en la protección de la salud y seguridad de los trabajadores. Dicha actitud resulta beneficiosa para éstas y para la sociedad a nivel socio-económico, al tiempo que repercute positivamente en su reputación e imagen corporativa (Armengou-Foix, 2006; Lopez-Lasaola, 2008).

La Ley Orgánica 13/1982, de 7 de abril, de *Integración Social de los Minusválidos (LISMI)*, señala que la finalidad primordial de la política de empleo de trabajadores con discapacidad debe ser su integración en condiciones que garanticen la aplicación del principio de igualdad de trato, en el sistema ordinario de trabajo o, en su defecto, su incorporación al sistema productivo a través de *Centros Especiales de Empleo (CEE)*. Por otra parte, la LISMI indica que las empresas públicas y privadas que empleen a un número de 50 o más trabajadores están obligadas a que, al menos, el 2% sean trabajadores discapacitados. Sin embargo, todavía son numerosas las empresas que no cubren dicho cupo (Oromí, 2006).

Según la “Encuesta de Discapacidad, Autonomía personal y situaciones



de Dependencia” publicada por el *Instituto Nacional de Estadística* (España) en 2008, las deficiencias más frecuentes entre los discapacitados se localizan en las articulaciones y los huesos, que afectan a más de 1,2 millones de ellos. Dichas discapacidades pertenecen al grupo de dolencias denominadas *trastornos músculo-esqueléticos* (TMEs). Por otra parte, el mayor porcentaje de personas con discapacidades ocupadas, se presentaba en las personas con discapacidades auditivas y visuales (42,8% y 32,8% respectivamente), seguida de aquellos con problemas de movilidad (21,6%). Resulta significativo que en 2008, de las personas discapacitadas ocupadas, 711.700 tuvieron que cambiar de trabajo o dejar de trabajar por su discapacidad.

Todo esto hace necesario ofrecer a las empresas mecanismos que les facilite cumplir con el cupo de ocupación de discapacitados exigido por la legislación vigente. Dicha ocupación debe tener carácter permanente, procurando que los puestos ocupados por los trabajadores con discapacidades sean compatibles con sus limitaciones tanto a corto como a largo plazo. Uno de estos mecanismos puede ser la *Rotación de Puestos de Trabajo* (RPT) (Vézina, 2004; Costa et al., 2009).

La RPT consiste en el cambio de un operario entre dos o más puestos de trabajo del mismo nivel y contenido tecnológico y/o funcional en periodos regulares o irregulares de tiempo. Es un tipo de organización del trabajo cada vez más extendida entre las empresas manufactureras y de servicios. La RPT puede facilitar tanto el retorno progresivo de trabajadores en proceso de rehabilitación de TMEs, como la integración de trabajadores con otros tipos de discapacidades. Además puede actuar como mecanismo de prevención de los TMEs (Vézina, 2004). La RPT permite asignar a los trabajadores a puestos compatibles con sus limitaciones controlando el tiempo que se exponen a factores de riesgo especialmente dañinos para ellos.

El diseño de una agenda de rotación que considere la integración en las empresas de trabajadores discapacitados es un problema complejo. La empresa debe generar perfiles de competencias para cada puesto y para cada trabajador. De esta forma los trabajadores pueden ser asignados a puestos que requieran las competencias que poseen. Se evita así que la selección de los trabajadores para ocupar los puestos se realice considerando factores sin relación con el adecuado desempeño de las funciones requeridas en ellos. Asimismo, se logra la alineación entre las estrategias organizacionales de la empresa y el desempeño efectivo del trabajador (Millas, 2005).

Por otra parte, para lograr el efecto preventivo de la RPT sobre los TMEs, ésta debe introducir alternancia efectiva entre los grupos musculares empleados por los trabajadores. Dicha técnica también permite reducir la monotonía y el aburrimiento, para lo cual, es necesario que la rotación introduzca variedad en el tipo de actividad mental desarrollada por los trabajadores. Por último, para que sea viable la RPT, se deben tener presentes las restricciones productivas y organizativas presentes en cada empresa, tales

como: los periodos de descanso, los tiempos de ciclo o las diferencias salariales entre los trabajadores.

Debido al gran número de aspectos que es necesario considerar a la hora de diseñar una agenda de RPT, el problema planteado pertenece al grupo denominado “Problemas de Horarios y Secuenciación” (*Timetabling y Scheduling problems*) (Papadimitriou y Steiglitz, 1982). Dichos problemas consisten en localizar la mejor configuración de un grupo de variables que, cumpliendo ciertas restricciones, minimicen (o en su caso maximicen) una función objetivo. Para la obtención de agendas de RPT se ha aplicado la programación entera (Carnahan et al., 2000; Tharmmaphornphilas et al., 2004) y se han propuesto diversas técnicas metaheurísticas (Carnahan et al., 2000; Seçkiner et al., 2007; Costa et al., 2009; Diego-mas et al., 2009).

En este trabajo se describe la aplicación del algoritmo genético DPI-ASEPEYO (DPI-A) (Diego-mas et al., 2009), a un caso de estudio localizado en una línea de ensamblaje. Se desea probar la capacidad del algoritmo para diseñar agendas de rotación que permitan la integración de trabajadores con discapacidades físicas, psíquicas y/o de comunicación en el sistema ordinario de trabajo, al tiempo que contribuyen a prevenir los TMEs.

El contenido del trabajo se estructura como sigue. En la Sección 2 se describe brevemente el algoritmo DPI-A. En la Sección 3 se plantea el caso de estudio. En la Sección 4 se recopilan los datos y parámetros derivados del análisis del caso. En la Sección 5 se muestran los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo DPI-A al problema planteado. Finalmente, en la Sección 5, se exponen las conclusiones derivadas del estudio.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO DPI-ASEPEYO

El procedimiento de obtención de agendas de rotación mediante el algoritmo DPI-A se inicia elaborando perfiles competenciales para cada puesto y para cada trabajador. Es decir, estableciendo los requerimientos de los puestos y las limitaciones de los trabajadores. Dichos perfiles se elaboran en base a 18 criterios que representan movimientos (ítems de movimiento) (ver columna 1 de la Tabla 1), y a un conjunto de 17 capacidades globales, psíquicas y de comunicación (ver columna 1 de la Tabla 2).

Los ítems de movimiento son puntuados para los puestos en función de la frecuencia con la que se realiza en ellos el movimiento que representan. Las puntuaciones de los ítems de movimiento tomarán los valores: 3 si el movimiento se realiza más de 8 veces por minuto, 2 si la frecuencia está entre 3 y 7 movimientos por minuto, 1 si se exige un movimiento por minuto y 0 si no se requiere el movimiento en el puesto.

Los trabajadores son valorados para los ítems de movimiento según sus limitaciones para realizar los diferentes movimientos. El algoritmo DPI-A asigna a los trabajadores sin problemas de movilidad un 0, si presentan limitación baja un 1, si la limitación es alta les asigna un 2,

y si son incapaces de realizar el movimiento los puntúa con un 3.

A continuación, se determina el conjunto de capacidades globales, psíquicas y de comunicación que son necesarias en los puestos y se registra qué trabajadores las tienen limitadas.

Obtenidos los perfiles competenciales de los puestos, el algoritmo DPI-A permite obtener agendas de rotación que maximicen la idoneidad de las asignaciones de los trabajadores a los puestos al tiempo que promueven la alternancia entre los grupos musculares empleados.

El algoritmo DPI-A es un algoritmo genético en el que las agendas de rotación se codifican mediante matrices de tamaño  $n_{\text{wor}} \times n_{\text{rot}}$ , siendo  $n_{\text{wor}}$  el número de trabajadores participantes, y  $n_{\text{rot}}$  el número de rotaciones. En cada celda se indica el puesto que ocupa un trabajador  $w$  en una rotación  $r$ . El algoritmo comienza con la generación aleatoria de una población de  $n_i$  individuos o agendas de rotación factibles, es decir, que no repiten un mismo puesto en una misma rotación. Posteriormente, se evalúa la calidad o aptitud de cada solución. La evaluación de los individuos se realiza en dos fases. En una primera fase se recalculan los valores de los ítems de movimiento de los trabajadores para cada rotación para reflejar la acumulación de fatiga debido a los puestos ocupados en las rotaciones precedentes (Ecuación 1).

En la siguiente fase se evalúa la aptitud ( $E$ ) o fitness de cada individuo o agenda de rotación (Ecuación 2). Para

ello se emplean los valores de los ítems de movimientos recalculados en la fase anterior y los de los puestos recopilados inicialmente. La aptitud de una agenda dependerá del grado de adecuación de las asignaciones de los trabajadores a los puestos en las diferentes rotaciones.

Una vez obtenida la aptitud, se penalizan, incrementando el valor de  $E$ , las agendas con asignaciones no deseadas, como por ejemplo, en las que un trabajador ocupa un puesto que exige capacidades que tiene limitadas, o asignaciones de un trabajador a un puesto en el que son necesarios movimientos que éste no puede realizar. También se penaliza la ocupación consecutiva de un puesto durante cierto tiempo máximo ( $t_{\text{max}}$ ). Finalmente, se seleccionan las soluciones supervivientes que pasarán a la siguiente generación mediante el "Método de la ruleta" (Goldberg, 1989). En dicha selección tendrán más probabilidad de ser elegidos los individuos con menor valor de  $E$ , y por tanto, será menos probable que sobrevivan las agendas penalizadas. Con el mismo procedimiento se escogen  $n_i \cdot p_c$  ( $p_c$  probabilidad de cruce) individuos sobre los que actúa el operador cruce. Como resultado del cruce se obtienen  $n_i \cdot p_c$  individuos hijos que pasarán a formar parte de la siguiente generación. Sobre  $n_i \cdot p_m$  individuos, de entre los individuos supervivientes y los individuos hijos, podrá actuar el operador mutación, siendo  $p_m$  la probabilidad de mutación. El algoritmo finaliza trascurrido un número determinado de generaciones. Tras dicho número de generaciones DPI-A propone una agenda de RPT basada en los perfiles

$$w^x_j(r) = w^x_j + \frac{1}{f_{\text{red}}} * \sum_{\substack{k=1 \\ p_j(a^x(k)) > \text{tre}}}^{r-1} \frac{p_j(a^x(k)) * t_k}{d_k}$$

Donde:

$$d_k = \begin{cases} p_{k,r} + \sum_{g=k+1}^{r-1} t_g & ; k < r-1 \\ 1 & ; k = r-1 \end{cases}$$

$d_k$  es el tiempo desde el fin de la rotación  $k$  y el comienzo de la actual rotación  $r$ , incluyendo pausas entre ellas  $p_{k,r}$ .

$w^x_j(r)$  es el valor del ítem  $j$  para el trabajador  $x$  en la rotación  $r$ .

$w^x_j$  es el valor original del ítem  $j$  para el trabajador  $x$ .

$a^x(k)$  es el puesto asignado al trabajador  $x$  en la rotación  $k$ .

$p_j(a^x(k))$  es el valor del ítem  $j$  en el puesto asignado al trabajador  $x$  en la rotación  $k$ .

$\text{tre}$  es el valor umbral (threshold) de los ítems de los puestos por debajo del cual se considera que no provocan fatiga.

$t_k$  es la duración de la rotación  $k$ .

$f_{\text{red}}$  es el factor de reducción o importancia del historial previo de rotaciones.

$p_{k,r}$  duración de las pausas entre la rotación  $k$  y la rotación  $r$ .

Ecuación 1: Cálculo del ítem  $j$  de un trabajador  $x$  para la rotación  $r$

$$E = \sum_{x=1}^{n_{\text{trab}}} \sum_{r=1}^{n_{\text{rot}}} \sum_{j=1}^{n_{\text{it}}} (C_j * w^x_j(r) * p_j(a^x(r)) * t_r)^u$$

Donde:

$n_{\text{trab}}$  es el número de trabajadores.

$n_{\text{rot}}$  es el número de rotaciones.

$n_{\text{it}}$  número de ítems de movimiento.

$C_j$  es el coeficiente de importancia relativa del ítem j respecto al resto de ítems

$w^x_j(r)$  es el valor del ítem j para el trabajador x en la rotación r.

$a^x(k)$  es el puesto asignado al trabajador x en la rotación k.

$p_j(a^x(k))$  es el valor del ítem j en el puesto asignado al trabajador x en la rotación k.

$t_r$  es la duración de la rotación r.

$u$  es el exponente de uniformidad que evita asignaciones descompensadas.

Ecuaçión 2: Función de evaluación de la aptitud o fitness (E) de una solución o agenda de rotación

competenciales de los puestos y de los trabajadores, y con alternancia de los grupos musculares empleados en cada rotación. En Diego-mas et. al (2009) se describe con detalle el algoritmo DPI-A.

Para la aplicación del algoritmo DPI-A resulta útil el software “MORE” (<http://www.ergonautas.upv.es/metodos/more/more.htm>) desarrollado por los propios autores de éste trabajo en colaboración con la mutua de accidentes de trabajo y enfermedades profesionales ASEPEYO.

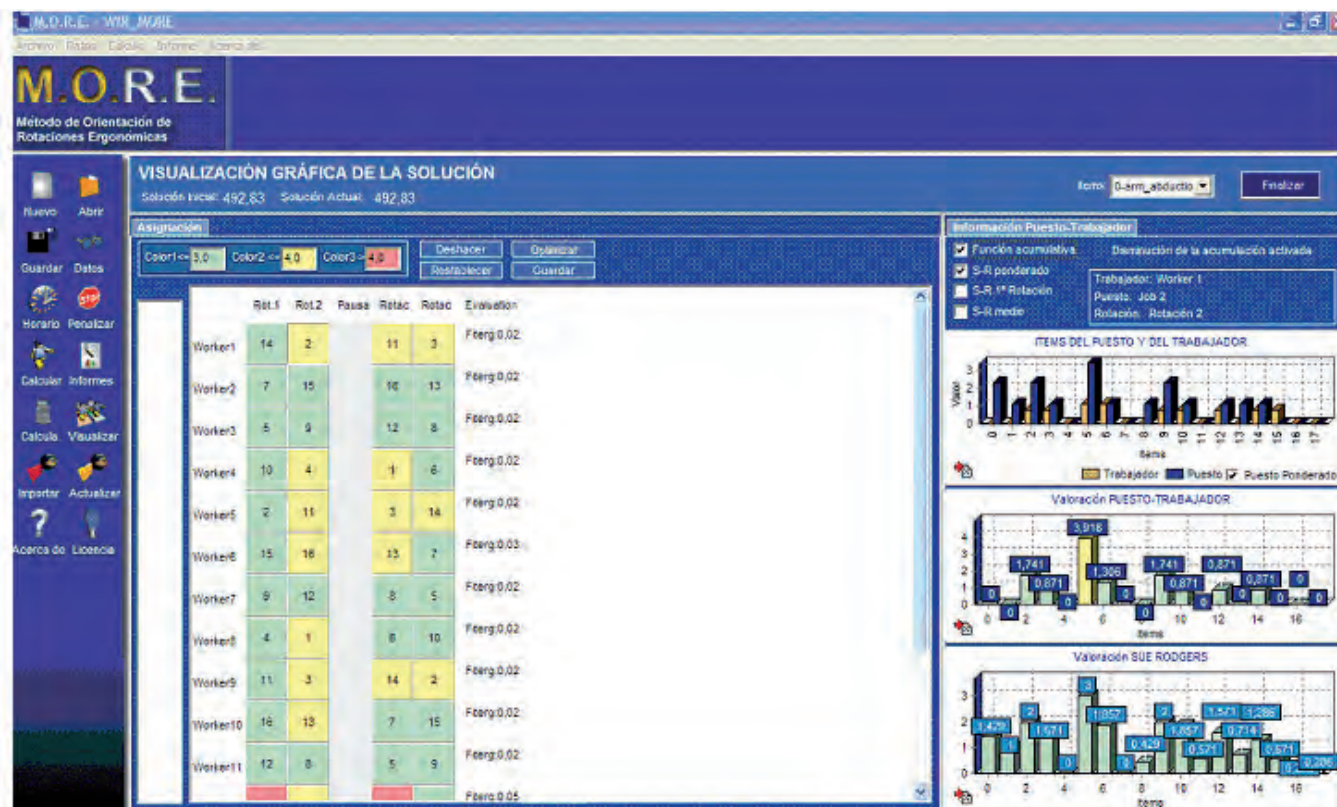


Figura 1: Interfaz principal de la aplicación informática MORE



### 3. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

En una línea de ensamblaje se deseaba diseñar un plan de rotaciones para 18 puestos de trabajo y el mismo número de trabajadores. Tres de los trabajadores seleccionados para la rotación estaban en proceso de recuperación de una lesión músculo-esquelética leve, por lo que el equipo médico desaconsejaba su exposición prolongada a determinados movimientos. Asimismo, tenían limitaciones en ciertas capacidades derivadas de sus problemas de movilidad. Además, se quería incorporar a un trabajador con problemas de visión a distancia. La jornada laboral era de 8 horas, con una hora de descanso para el almuerzo. Se establecieron 4 rotaciones, las tres primeras de 2 horas y la última de 1 hora. La pausa de descanso fue situada después de la segunda rotación. La adopción del plan de rotaciones contó con el apoyo de la dirección, y fue enmarcado dentro de un Plan General de Mejora Ergonómica y de Responsabilidad Social Corporativa de la empresa.

#### 3.1. ESTUDIO DE LA REPETITIVIDAD DE MOVIMIENTOS DE LOS PUESTOS

La mayoría de los puestos presentaban una elevada repetitividad de movimientos del cuello y de los miembros superiores. Dicha circunstancia complicaba la integración de trabajadores con dificultades de movilidad en el cuello, como por ejemplo, con problemas cervicales. Respecto a los miembros superiores, sólo en el 5,6% de los puestos era poco frecuente el movimiento de flexión de brazo. En todos los puestos se exigía flexión de antebrazo. Así pues, se hacía difícil la integración de trabajadores con problemas en la flexión de brazo o antebrazo (epicondilitis o tendinitis).

Respecto al movimiento de elevación del hombro se observó que en la mayoría de los puestos era poco frecuente y en el resto inexistente. En el caso de los movimientos que afectaban a la muñeca y a los dedos, en todos los puestos se exigía flexión de muñeca, en la mayoría de los casos con frecuencia moderada o baja. La extensión de muñeca, o bien no existía, o en los puestos en los que estaba presente se exigía a baja frecuencia. El giro de muñeca se observó en todos los puestos. Por otra parte, el movimiento de lateralización no se realizaba en todos los puestos, y en los casos en los que era necesario, se realizaba a baja frecuencia. Todos los puestos requerían el empleo de los dedos para realizar agarres, en la mayor parte de los puestos a frecuencia moderada. Dichos resultados ponían de manifiesto la dificultad para integrar en la línea a trabajadores con lesiones en la muñeca o en los dedos, como por ejemplo, trabajadores con el síndrome del túnel carpiano o dedo en gatillo.

El movimiento de flexión de tronco se exigía en todos los puestos. En ningún puesto era necesaria la extensión de tronco. La rotación del tronco tenía una repetitividad moderada o poco frecuente. La lateralización de tronco exigida en los puestos era poco frecuente o inexistente. Así pues resultaba complicada la inclusión de trabajadores con problemas en la flexión del tronco, no así en los movimientos de extensión y lateralización de dicho miembro.

Finalmente, la flexión de piernas no se exigía en todos los puestos, y, en los que estaba presente, la frecuencia de la repetición era moderada o poco frecuente. La escasa frecuencia de flexión de piernas podía facilitar el trabajo de operarios con problemas leves en dicho movimiento.

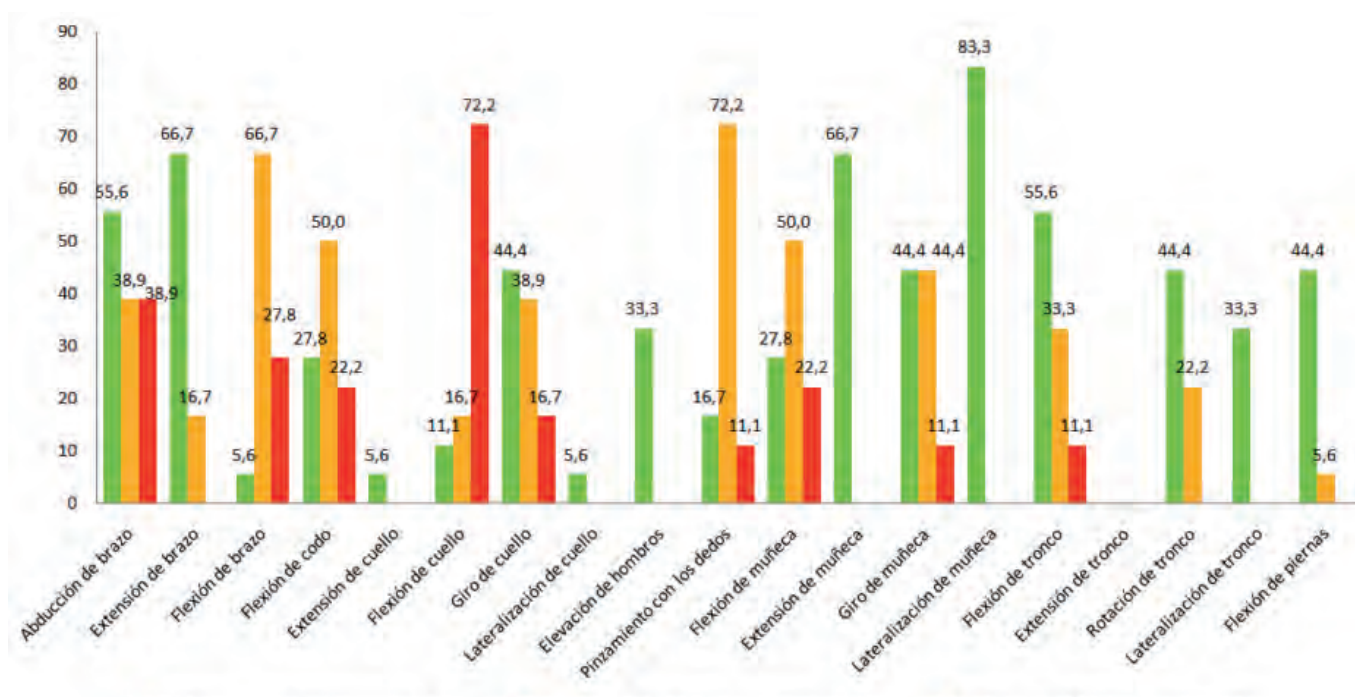


Fig. 2: Porcentajes de frecuencias de los 19 movimientos analizados en los 18 puestos

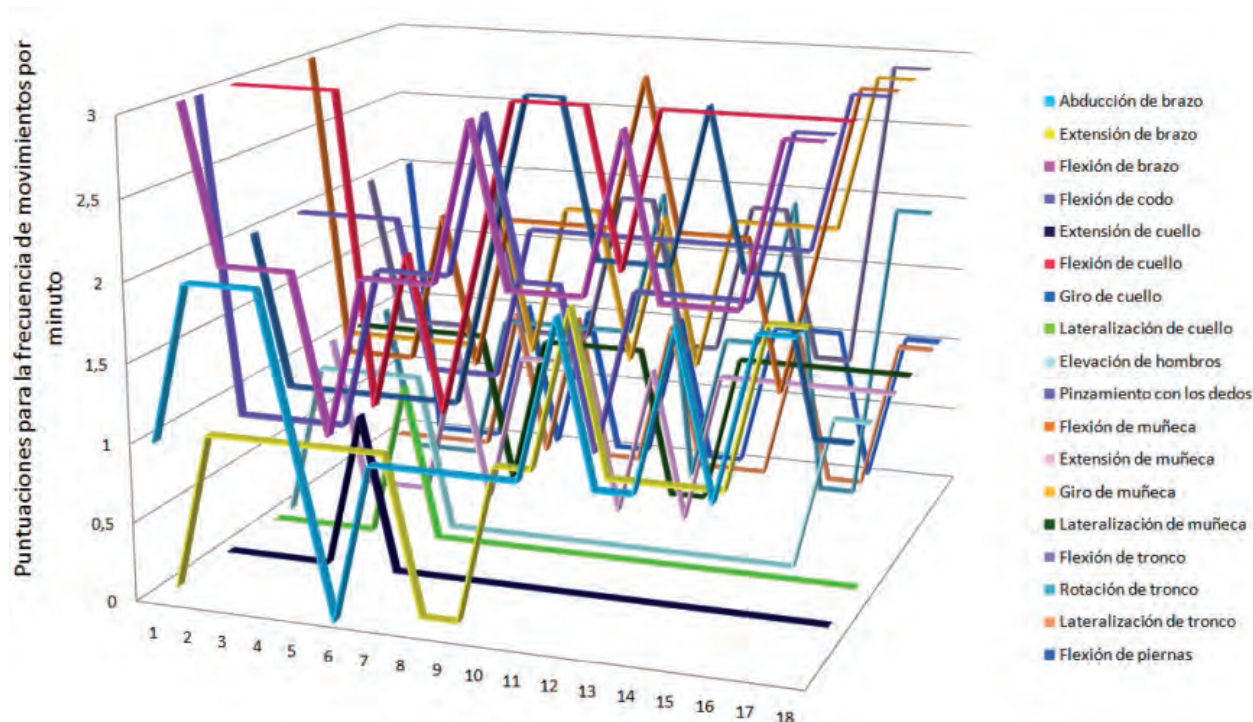


Figura 3: Variación en los niveles de riesgo para cada movimiento entre los puestos

Como resultado de la evaluación de la repetitividad de movimientos presente en los puestos se observó que ninguno suponía la exposición de los trabajadores a sobreesfuerzos.

Además, se constató que existía variedad en los niveles de riesgo asociados a los movimientos entre los puestos (Figura 3). Dicha variedad podría permitir alternar asignaciones que

Puesto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Abducción de brazo	1	2	2	2	1	0	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	2	2
Extensión de brazo	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	2	1	1	1	1	2	2
Flexión de brazo	3	2	2	2	1	2	2	2	3	2	2	2	3	2	2	2	3	3
Flexión de codo	3	1	1	1	1	2	2	2	3	2	2	1	2	2	2	2	3	3
Extensión de cuello	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flexión de cuello	3	3	3	3	1	2	1	2	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3
Giro de cuello	2	1	1	1	1	1	1	2	3	3	2	2	2	3	2	2	1	1
Lateralización de cuello	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Elevación de hombros	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Pinzamiento con los dedos	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
Flexión de muñeca	3	1	1	1	2	1	2	2	2	2	3	2	2	2	1	2	3	3
Extensión de muñeca	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
Giro de muñeca	1	1	1	1	1	2	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	3	3
Lateralización de muñeca	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
Flexión de tronco	2	1	1	1	2	1	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	3	3
Extensión de tronco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rotación de tronco	1	0	0	0	1	1	1	1	1	2	0	1	1	2	0	0	2	2
Lateralización de tronco	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1
Flexión de piernas	2	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1

Tabla 1: Puntuaciones de los ítems de movimiento de los 18 puestos analizados

supusieran acumulación de fatiga en un grupo muscular con otras que favorecieran la recuperación de éste. En los casos con menor variedad en los niveles de riesgo, éstos eran bajos y, por lo tanto, asignaciones consecutivas entre dichos puestos no resultarían, según el equipo médico de la empresa, perjudiciales.

#### 4. PERFILES COMPETENCIALES Y PARÁMETROS DE DPI-A

Para el caso en estudio se obtuvieron los perfiles competenciales de los puestos recogidos en las Tablas 1 y 2.

Puesto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Estar de pie	•					•	•	•	•	•		•	•		•	•	•	•
Subir (escaleras, pendientes)	•					•												
Trepar (con piernas y brazos)						•												
Coordinar movimientos	•				•	•	•	•	•	•			•		•	•	•	•
Ejercer fuerza estando quieto	•				•	•	•	•	•	•		•	•			•	•	•
Ejercer fuerza en movimiento	•					•												
Conducir vehículos					•													
Trabajar en las Alturas						•												
Razonar/Tomar decisiones complejas	•	•	•	•	•						•					•	•	•
Responsabilidad	•	•	•	•	•	•					•					•	•	•
Iniciativa/Autonomía		•	•	•							•					•	•	•
Ver de lejos	•				•	•	•	•	•	•								•
Oír	•				•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Localizar la Dirección del sonido	•				•	•												•
Escribir		•	•	•			•			•					•	•		
Usar el teclado		•	•	•														
Usar el ratón		•	•	•														

Tabla 2: Capacidades necesarias en los 18 puestos analizados. Las celdas vacías indican que la capacidad no era necesaria en el puesto

También se obtuvieron los perfiles competenciales de los trabajadores. Para ello, el equipo médico determinó el grado de limitación de los trabajadores para realizar ciertos movimientos. Sólo en tres de ellos observaron limitaciones (Tabla 3). Respecto a las capacidades se registraron limitaciones únicamente en 4 trabajadores.

Trabajador	12	14	15
Extensión de cuello	0	2	0
Flexión de cuello	0	1	0
Giro de cuello	0	1	0
Lateralización de cuello	0	2	0
Elevación de hombros	2	1	0
Flexión de tronco	2	1	0
Rotación de tronco	3	2	0
Lateralización de tronco	3	1	0
Flexión de piernas	2	0	2

Tabla 3: Trabajadores con limitaciones en ciertos movimientos

Trabajador	12	13	14	15
Estar de pie	•			
Subir (escaleras, pendientes)	•		•	•
Trepar (con piernas y brazos)	•		•	•
Coordinar movimientos	•			
Ejercer fuerza estando quieto	•		•	
Ejercer fuerza en movimiento	•		•	•
Conducir vehículos	•	•	•	
Trabajar en las Alturas	•		•	•
Ver de lejos		•		

Tabla 4: Trabajadores con capacidades limitadas



Seguidamente se recopilamos el conjunto de las asignaciones no deseadas. Dichas restricciones se obtuvieron del cruce de la información sobre las limitaciones de movimiento (Tabla 3) y en las capacidades de los trabajadores (Tabla 4), con la recopilada acerca de los movimientos (Tabla 1) y las capacidades requeridas en los puestos (Tabla 2).

inclusión de los trabajadores con discapacidades no suponía que el algoritmo propusiera agendas de rotación con aptitudes significativamente peores que, por lo tanto, desaconsejaran la opción de la integración. Los experimentos se realizaron con el software MORE.

El algoritmo DPI-A fue ejecutado 10 veces para el

Puesto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Trabajador 12	•				•	•	•	•	•	•		•	•		•	•	•	•
Trabajador 13	•				•	•	•		•	•							•	•
Trabajador 14	•				•	•	•	•	•	•		•	•				•	•
Trabajador 15	•					•												

Tabla 5: Asignaciones vetadas trabajador-puesto (las celdas con punto indican que el trabajador no debe ser asignado al puesto)

Parámetro	Definición	Valores
$n_{wor}$	Número de trabajadores y puestos	18
$n_{rot}$	Número de rotaciones	4
$n_{it}$	Número de ítems considerados en la fórmula de evaluación	18
$C_1 \dots C_{18}$	Coefficientes de ponderación de los ítems	1
$f_{red}$	Factor de reducción	3
$tre$	Valor umbral	1
$t_1$	Duración de la Rotación 1	2 horas
$t_2$	Duración de la Rotación 2	2 horas
$t_3$	Duración de la Rotación 3	2 horas
$t_4$	Duración de la Rotación 4	1 hora
$p_1$	Duración de la pausa 1 (almuerzo)	2 horas
$t_{max}$	Tiempo máximo consecutivo de permanencia en puestos similares	2 horas
Gen	Número de generaciones tras las que se detendrá el algoritmo	4000
$n_i$	Individuos en cada generación	50
$p_c$	Probabilidad de cruce	0,6
$p_m$	Probabilidad de mutación	0,3

Tabla 6: Parámetros de ejecución de DPI-A

Finalmente se establecieron los valores de los parámetros necesarios para la ejecución de DPI-A (Tabla 6) mediante el software MORE. Dichos parámetros incluyen valores propios de los algoritmos genéticos y valores específicos empujados por DPI-A dependientes del caso de estudio.

## 5. RESULTADOS

Para la realización de los experimentos se definieron dos escenarios, el primero incluía a los trabajadores con discapacidades (12, 14 y 15), en adelante “Rotación con Integración” (RCI), y el segundo suponía que todos los trabajadores eran capaces de realizar todos los movimientos sin limitación y tampoco presentaban dificultades en ninguna capacidad, escenario identificado como “Rotación Sin Integración” (RSI). Se trataba con ello de demostrar que la

escenario RCI con los parámetros indicados en (Tabla 6), y otras 10 para el escenario RSI con los mismo parámetros. El tiempo empleado por el algoritmo fue de 2 horas 47 minutos para RCI y de 1 hora 34 minutos para RSI, siendo mayor para RCI debido al mayor número de restricciones del problema. Ambos datos se consideraron tiempos de cálculo aceptables en el entorno del problema planteado. En todas las ejecuciones el algoritmo fue capaz de obtener soluciones factibles, y por lo tanto, sujetas a las restricciones del problema. El algoritmo DPI-A trata de minimizar el valor de la función objetivo (E), por lo que un valor menor de E supone una mejor asignación de los trabajadores. La mejor aptitud alcanzada en RCI fue de 607,11 (Tabla 6) mientras que RSI logró una aptitud de 567,85 (Tabla 7).

El estudio de la evolución de los valores de los ítems de movimiento a lo largo de las rotaciones para la mejor solución de RCI (Tabla 7) permitió comprobar la eficacia del algoritmo DPI-A para encontrar asignaciones capaces de

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste Asignación
1	Puesto 17	Puesto 16	Puesto 15	Puesto 5	41,11
2	Puesto 14	Puesto 3	Puesto 1	Puesto 6	32,75
3	Puesto 4	Puesto 14	Puesto 13	Puesto 7	30,41
4	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 14	Puesto 4	31,62
5	Puesto 12	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 10	29,77
6	Puesto 7	Puesto 18	Puesto 2	Puesto 9	28,59
7	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 3	Puesto 17	25,96
8	Puesto 8	Puesto 13	Puesto 12	Puesto 8	34,11
9	Puesto 15	Puesto 7	Puesto 18	Puesto 16	31,4
10	Puesto 18	Puesto 8	Puesto 10	Puesto 2	43,42
11	Puesto 3	Puesto 9	Puesto 7	Puesto 14	25,08
12	Puesto 11	Puesto 4	Puesto 11	Puesto 3	42,04
13	Puesto 13	Puesto 12	Puesto 8	Puesto 13	35,21
14	Puesto 16	Puesto 2	Puesto 16	Puesto 11	55,71
15	Puesto 2	Puesto 11	Puesto 9	Puesto 12	32,18
16	Puesto 9	Puesto 5	Puesto 17	Puesto 15	33,95
17	Puesto 5	Puesto 17	Puesto 4	Puesto 1	25,04
18	Puesto 10	Puesto 15	Puesto 5	Puesto 18	28,75
Coste medio					33,32
Desviación típicas					7,9
Mejor Aptitud					607,1

Tabla 7: Mejor solución encontrada en el escenario RCI en la ejecución 6

evitar el incremento progresivo de la mayoría de los ítems de movimiento, es decir, evitar la acumulación de la fatiga. La Figura 4 muestra la variación del valor de los ítems de movimiento para el trabajador 12 en la mejor solución alcanzada para RCI. Se observa que los ítems con valores iniciales superiores a 0 (elevación de hombros, flexión de tronco, giro de tronco, lateralización de tronco, flexión de piernas) mantienen el valor inicial. El algoritmo fue capaz de asignar al trabajador 12 a puestos que no exigían dichos movimientos, o el valor de los ítems era inferior al valor del parámetro tres (1,5), valor por debajo del cual el equipo médico consideró que el puesto no provocaba fatiga. Además, los puestos asignados requerían capacidades para las que el trabajador no estaba limitado. El trabajador 14 fue asignado a puestos que aumentaron únicamente los ítems de flexión y rotación de cuello. Su asignación a puestos con estos movimientos de cuello no pudo ser evitada debido a que estaban presentes en todos ellos, provocando el incremento progresivo de los correspondientes ítems. Sólo se registró disminución después de la pausa para el almuerzo (Figura 5). Sin embargo, sí fue posible asignar al trabajador puestos que no exigían lateralización de cuello, elevación de hombros o movimientos del tronco, movimientos todos ellos para los que también estaba limitado. El equipo médico determinó que, a pesar de los incrementos progresivos registrados en los ítems de movimiento referidos, estos podían considerarse, en principio, aptos para el trabajador, a la espera controles médicos posteriores a la implantación de la agenda de rotación. Finalmente, el trabajador 15 fue

asignado a puestos que no exigían la flexión de piernas que era el único movimiento para el que presentaba problemas, y por lo tanto, el ítem correspondiente se mantuvo constante al valor inicial de 2. Todos los puestos asignados al trabajador 15 (2, 11, 9 y 12) eran compatibles con sus limitaciones (subir escaleras o pendientes, ejercer fuerza parado o caminando y trabajar en altura).

Sólo en el caso de los trabajadores 12 y 14, ambos con limitaciones en movimientos y capacidades, se repetía la asignación de un mismo puesto a lo largo de la jornada, pero nunca en rotaciones consecutivas. El resto de los trabajadores ocupaban puestos distintos en cada rotación.

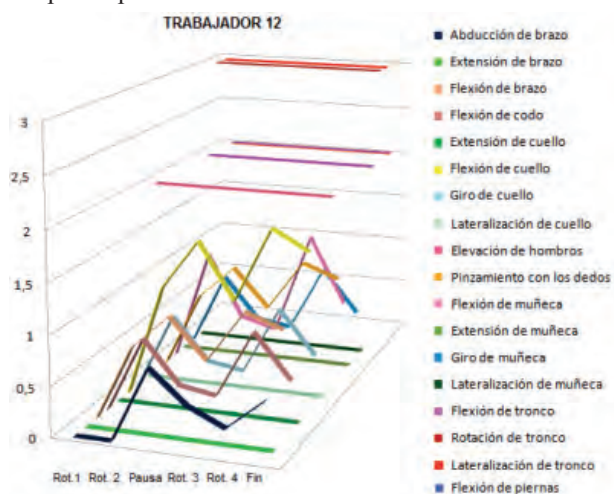


Figura 4: Variación de los valores de los ítems de movimiento del trabajador 12

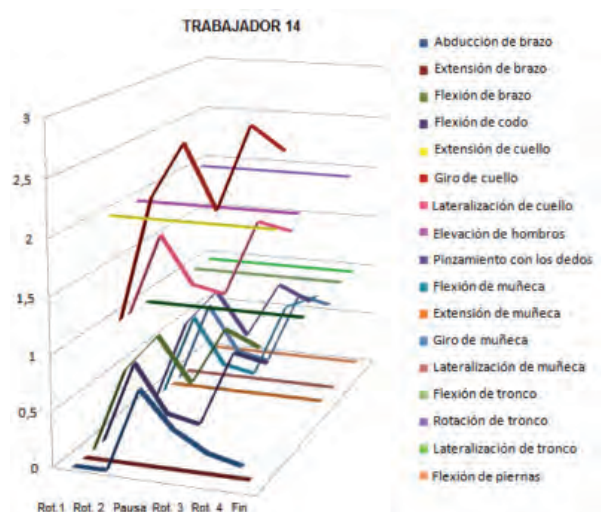


Figura 5: Variación de los valores de los ítems de movimiento del trabajador 14

## 6. CONCLUSIONES

La RPT es conocida como técnica organizativa que permite obtener diversos beneficios tanto para los trabajadores implicados como para la empresa implantadora. Los resultados de este trabajo han permitido comprobar que, además de lograr la disminución de la monotonía y prevenir la aparición de TMEs, la RPT permite la incorporación de trabajadores con discapacidad en los procesos de trabajo ordinarios, sin la necesidad de adaptaciones especiales de los entornos productivos. De esta forma se logra una integración mayor sin que esto suponga un deterioro de la producción y de las condiciones laborales del resto de trabajadores.

La inclusión de trabajadores con discapacidades no impide al algoritmo DPI-A lograr soluciones con variación en los puestos ocupados por el resto de trabajadores, contribuyendo a disminuir la monotonía y favoreciendo la alternancia de los grupos musculares empleados por estos.

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste Asignación
1	Puesto 11	Puesto 3	Puesto 9	Puesto 5	29,84
2	Puesto 5	Puesto 15	Puesto 13	Puesto 12	20,18
3	Puesto 17	Puesto 8	Puesto 3	Puesto 14	39,71
4	Puesto 13	Puesto 7	Puesto 14	Puesto 2	28,46
5	Puesto 16	Puesto 5	Puesto 18	Puesto 16	28,96
6	Puesto 14	Puesto 4	Puesto 1	Puesto 6	32,75
7	Puesto 7	Puesto 14	Puesto 2	Puesto 11	21,42
8	Puesto 12	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 10	29,77
9	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 11	Puesto 3	27
12	Puesto 18	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 15	38,36
13	Puesto 1	Puesto 12	Puesto 8	Puesto 4	32,46
14	Puesto 8	Puesto 13	Puesto 12	Puesto 9	36,77
15	Puesto 10	Puesto 16	Puesto 4	Puesto 18	35,75
16	Puesto 4	Puesto 18	Puesto 16	Puesto 7	33,38
17	Puesto 2	Puesto 9	Puesto 7	Puesto 17	27,32
18	Puesto 15	Puesto 11	Puesto 5	Puesto 13	26,96
Coste medio					32,36
Desviación típicas					5,54
Mejor Aptitud					567,84

Tabla 8: Mejor solución encontrada en el escenario RSI en la ejecución 4

En relación al equilibrio de las asignaciones entre los trabajadores en las mejores soluciones de RCI y RSI, se observó que las asignaciones del escenario RSI eran más equilibradas que las de RCI, con una desviación típica de los coste de asignación de 7,9 en RCI y de 5,54 en RSI. Los desequilibrios mayores en RCI se debieron, por una parte, a los valores iniciales mayores a cero de ciertos ítems de movimiento de los trabajadores discapacitados, y por otra, a la rigidez impuesta por las restricciones derivadas de las discapacidades de los trabajadores, que disminuyeron la capacidad del algoritmo para lograr asignaciones con menor desequilibrio.

Además, tampoco supone que puestos considerados “ligeros” sean asignados a un único trabajador, con el consiguiente rechazo del resto de trabajadores. En el caso de estudio sólo el puesto 11, de carácter administrativo, fue asignado únicamente a trabajadores con discapacidades, si bien su asignación se alternó entre los tres existentes. Aunque en el escenario RSI el algoritmo obtuvo una solución con una aptitud algo menor que la alcanzada para RCI, y con una uniformidad algo menor en la carga de los trabajadores, dicho pequeño empeoramiento puede considerarse sobradamente compensado por los beneficios socio-económicos derivados de la integración de trabajadores con discapacidades.



No obstante, queda pendiente validar el resultado post-implantación de las agendas de rotación propuestas por el algoritmo DPI-A con integración de discapacitados. Para ello será necesaria la recopilación de datos pasado un tiempo suficiente tras su implantación. Dichos datos deberán ser comparados con las incidencias músculo-esqueléticas anteriores a la propuesta adoptada. Debido al carácter acumulativo de los TMEs será necesario un tiempo suficientemente largo de observación; por lo menos de 2 años. Este plazo ha transcurrido ya en una línea de montaje de componentes de automóviles en la que se empleó el algoritmo DPI-A para establecer el plan de rotaciones bajo condiciones similares a las del caso de estudio planteado. En ese año, 2007, se registraron en dicha línea 186 asistencias médicas por TMEs. Tras la implantación de rotaciones, en 2008, el número de asistencias médicas se redujo a 169, y en 2009 a 112, lográndose una reducción del 40% aproximadamente en la incidencia de los TMEs, sin que la consideración de las discapacidades supusiera una merma en la calidad de la solución implantada.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Politécnica de Valencia su apoyo a esta investigación a través de su Programa de Apoyo a la Investigación y Desarrollo 2009 y su financiación a través de los proyectos PAID-06-09/2902 y PAID-05-09/4215.

El trabajo descrito en el presente artículo ha contado con la colaboración de la Mutua de Accidentes Laborales y Enfermedades Profesionales ASEPEYO, a través de José Enrique Aparisi-Navarro Director Autonómico de Seguridad e Higiene Comunidad Valenciana e Illes Balears de Asepeyo.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- "Campana europea contra los trastornos músculo-esqueléticos". *DYNA Ingeniería e Industria*. 2010. Vol.82-6 p.336
- "Encuesta de Discapacidad, Autonomía personal y situaciones de Dependencia". Instituto Nacional de Estadística. España. 2008.
- Armengou-Foix R. La responsabilidad social corporativa: Protección de trabajadores sensibles a determinados riesgos [en línea]. *Asepeyo*, [ref. de Julio de 2010]. Disponible en Web: [http://iwebintra.asepeyo.es/Web/Biblioteca.nsf/ficheros/monografia28abril2006.pdf/\\$file/monografia28abril2006.pdf](http://iwebintra.asepeyo.es/Web/Biblioteca.nsf/ficheros/monografia28abril2006.pdf/$file/monografia28abril2006.pdf)
- Bernard B. "Musculoskeletal disorders and workplace factors: A critical review of epidemiological evidence for work-related musculoskeletal disorders of the neck, upper extremity, and low back". National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). 1997.
- Carnahan BJ, Redfern MS, Norman B. "Designing safe Job Rotations schedules using optimization and heuristic search". *Ergonomics*. 2000. Vol. 43 p.543-560.
- Costa AM, Miralles C. "Job rotation in assembly lines employing disabled workers". *Int. J. Production Economics*. 2009. Vol.120 p.625 - 632.
- Diego-Mas JA, Asensio-Cuesta S, Sanchez-Romero MA, Artacho-Ramirez MA "A multi-criteria genetic algorithm for the generation of Job Rotations schedules". *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2008. Vol. 39 p.23-33.
- Diego-Mas JA, Asensio-Cuesta S. Rotación de puestos de trabajo: Método MORE. [en línea]. *Universidad Politécnica e Valencia*, [ref. de Julio de 2010]. Disponible en Web: <<http://www.ergonautas.upv.es/metodos/more/more.htm>>.
- España. Ley orgánica 13/1982, de 7 de abril, de Integración Social de los Minusválidos. *Boletín Oficial del Estado*, 30 de Abril de 1982, núm. 103, p. 11106 a 11112.
- Goldberg DE. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley Publishing Company Inc. Massachusetts. 1989. p.412. ISBN: 0-201-15767-5.
- López-Lasaola R. "¿Es rentable la prevención?". *DYNA Ingeniería e Industria*. 2008. Vol.83-2 p.119-122
- Millas V, Calderón B. "Guía Práctica para la elaboración de un programa de integración laboral de personas con discapacidad". *Acción RSE*. 2005.
- Oromí A. El 80% de las empresas españolas no cumple la ley de integración de discapacitados [en línea]. *Fundación prevent*. [ref. de Octubre de 2010]. Disponible en Web: <http://www.fundacionprevent.com/Fundacion/pdf/45.pdf>.
- Papadimitriou CH, Steiglitz K., *Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity*. Dover Publications Inc. New York. 1982. ISBN 0-486-40258-4.
- Seckiner SU y Kurt M. 2007. "Ant colony optimization for the Job Rotation scheduling problem". *Applied Mathematics and Computation*. 2007. Vol. 201 p.149-160.
- Tharmmaphornphilas W, Norman B. "A quantitative method for determining proper Job Rotation intervals". *Annals of operations research*. 2004. Vol. 128 p.251-266.
- Vézina N. "Rotation implantation: what is at stake? What are the markers". *WorkShop Principles and Practices of Job Rotation*. Centre of Research Expertise for the Prevention of Musculoskeletal Disorders. 2004. p.1-22.

# desarrollo sostenible

## desarrollo sostenible

De acuerdo con los contenidos recogidos en esta Sección referente a la normativa relacionada con el Desarrollo Sostenible, a continuación comentamos algunas de las últimas novedades legislativas en esta materia.



### A nivel de la Unión Europea

**Reglamento (UE) nº 333/2011 del Consejo, de 31 de marzo de 2011, por el que se establecen criterios para determinar cuándo determinados tipos de chatarra dejan de ser residuos con arreglo a la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo (DOUEL 08/04/2011)**

El Reglamento establece los criterios para determinar cuándo la chatarra de hierro, acero y aluminio, incluida la chatarra de aleación de aluminio, deja de ser residuo.

Dichos criterios garantizan que estos tipos de chatarra, resultantes de las operaciones de recuperación, cumplan los requisitos técnicos de la industria de la producción de metales, así como la legislación y las normas existentes aplicables a los productos, y no dé lugar a impactos globales negativos para el medio ambiente o la salud humana.

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:094:0002:0011:ES:PDF>

### En España

**Orden ARM/795/2011, de 31 de marzo, por la que se modifica el Anexo III del Real Decreto 679/2006, de 2 de junio, por el que se regula la gestión de los aceites industriales usados (BOE 07/04/2011)**

Mediante la Orden ARM/795/2011, se modifica el anexo III del Real Decreto 679/2006, de 2 de junio, con el fin de adaptarlo al nuevo Reglamento (CE) nº 948/2009 de la Comisión, de 30 de septiembre, que modifica el Reglamento (CEE) nº 2658/87, de 23 de julio, por la que desaparecen y se sustituyen algunos códigos de Nomenclatura Combinada, que corresponden a los aceites industriales usados.

<http://www.boe.es/boe/dias/2011/04/07/pdfs/BOE-A-2011-6239.pdf>

### En las Comunidades Autónomas

**CANARIAS: Ley 7/2011, de 5 de abril, de actividades clasificadas y espectáculos públicos y otras medidas administrativas complementarias (BOIC 15/04/2011)**

Por lo que respecta al régimen autorizatorio de las actividades la Ley distingue dos instrumentos de intervención, como son: la comunicación previa y la autorización administrativa. El régimen ordinario de intervención será la comunicación previa y el régimen de autorización administrativa, operará de forma excepcional, respecto a aquellas actividades para las que el Gobierno mediante decreto establezca expresa y motivadamente, cuando concurren la circunstancias siguientes: que, por sus propias características objetivas o su emplazamiento, presenten un riesgo de incidencia grave o muy grave sobre los factores que clasifican la actividad respectiva, y que de producirse tal incidencia, los efectos negativos que se producirían fueren irreversibles o difícilmente reversibles.

Igualmente, se regulan diversas situaciones como el régimen de precedencia de la licencia de actividad con respecto a la de obra; los requisitos exigibles a la apertura de actividades en edificios ilegales; la tipología de obras admisibles para la apertura de actividades en edificios en situación de fuera de ordenación; la posibilidad de autorizar instalaciones y actividades provisionales cuyo uso no coincida con el expresamente establecido en el planeamiento y la posibilidad de instalaciones o actividades públicas en terrenos o parcelas afectos a usos distintos cuando lo exija el interés general.

También forma parte del contenido de la norma, la articulación de los preceptos que salven la yuxtaposición procedimental con respecto a aquellas actividades sujetas a autorización ambiental integrada u otro tipo de autorizaciones sectoriales.

El nuevo texto legal potencia los mecanismos de control a posteriori, a cuyo fin se ha operado una sistematización y nueva regulación de los sistemas de comprobación, inspección y sanción de instalaciones y de actividades, así como de los supuestos de extinción, revocación, caducidad y revisión de títulos habilitantes.

<http://www.gobcan.es/boc/2011/077/001.html>



---

**NAVARRA: Decreto Foral 23/2011, de 28 de marzo, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición en el ámbito territorial de la Comunidad Foral de Navarra (BON 8/04/2011)**

---

Esta norma pretende facilitar la ejecución del régimen jurídico aplicable a la producción y gestión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), con el objeto de mejorar la gestión de estos residuos potenciando su reciclado y valorización y reduciendo al máximo su eliminación en vertedero.

Asimismo, el Decreto establece las fianzas exigibles por parte de las Administraciones Públicas a los productores, poseedores y/o gestores para garantizar su correcta gestión. Concreta cual es la cantidad mínima de RCD a los que se les exige una gestión específica diferenciada de la que se aplica a las pequeñas cantidades de este tipo de residuos y que, en su caso, puedan tener la consideración de residuos sólidos urbanos y, establecer los requisitos técnicos mínimos de las plantas de tratamiento de RCD, para garantizar su adecuada gestión.

[http://www.navarra.es/home\\_es/Actualidad/BON/Boletines/2011/69/Anuncio-0/](http://www.navarra.es/home_es/Actualidad/BON/Boletines/2011/69/Anuncio-0/)

---

**CASTILLA LA MANCHA: Ley 9/2011, de 21 de marzo, por la que se crean el canon eólico y el fondo para el Desarrollo Tecnológico de las Energías Renovables y el Uso Racional de la Energía en Castilla-La Mancha (BOE 03/05/2011)**

---

La presente Ley crea el canon eólico como prestación patrimonial pública de naturaleza finalista y extrafiscal, concebido como instrumento destinado a internalizar los costes sociales, económicos y ambientales mencionados y dirigido a estimular y promover el desarrollo tecnológico, con especial incidencia en lo referente a la potencia de los aerogeneradores, lo cual redundará en minimizar las afecciones derivadas de este tipo de actividad, mediante la reducción de la superficie afectada por las instalaciones y la consiguiente liberación de territorio para su aprovechamiento general.

Con carácter complementario, se crea el Fondo para el Desarrollo Tecnológico de las Energías Renovables y el Uso Racional de la Energía en Castilla-La Mancha, como instrumento de consolidación del modelo energético regional plasmado en la ley 1/2007, de 15 de febrero, de fomento de las energías renovables e incentivación del ahorro y la eficiencia energética en esta comunidad y que se integrará con los recursos derivados del canon eólico.

<http://www.boe.es/boe/dias/2011/05/03/pdfs/BOE-A-2011-7842.pdf>

---

**EXTREMADURA: Decreto 54/2011, de 29 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de Evaluación Ambiental de la Comunidad Autónoma de Extremadura (DOE 06/05/2011)**

---

El Decreto recoge la aprobación del Reglamento de evaluación de impacto ambiental en la Comunidad Autónoma de Extremadura, que desarrolla la Ley 5/2010, de 23 de junio, de prevención y calidad ambiental de esta comunidad, en los aspectos relativos a la evaluación ambiental de planes y programas y la evaluación de impacto ambiental de proyectos.

La norma regula en su título segundo, la evaluación ambiental de planes y programas que se elaboren o aprueben por una Administración autonómica o local y que sean exigidos por una disposición legal o reglamentaria o por acuerdo del Consejo de Gobierno de la Junta de Extremadura; y dedica su título tercero a la evaluación de impacto ambiental de proyectos.

<http://doe.juntaex.es/pdfs/doe/2011/8600/11040063.pdf>

---

**EXTREMADURA: Decreto 20/2011, de 25 de febrero, por el que se establece el régimen jurídico de la producción, posesión y gestión de los residuos de construcción y demolición en la Comunidad Autónoma de Extremadura (DOE 3/03/2011)**

---

El Decreto tiene por objeto el establecimiento de la regulación de las actividades de producción, posesión y gestión de los residuos de construcción y demolición, y dentro de su ámbito de actuación se establecen los siguientes objetivos:

- a) Garantizar que las operaciones de recogida, transporte, reciclado, valorización y eliminación de los residuos de construcción y demolición, se ejecuten con las mejores técnicas disponibles.
- b) Promover las condiciones técnicas y administrativas precisas, para garantizar el cumplimiento de los objetivos de reducción en la generación de residuos de construcción y demolición, reutilización, reciclado, valorización y eliminación establecidos en los Planes de residuos vigentes.
- c) Recuperar, cuando sea factible, los recursos contenidos en dichos residuos contribuyendo a un desarrollo sostenible de las actividades de construcción y demolición.
- d) Facilitar la gestión adecuada de los diferentes residuos procedentes de las actividades reguladas en este decreto, mediante una previa separación en origen.
- e) Garantizar la eliminación ordenada de los residuos no valorizables de la construcción y demolición, impidiendo su abandono.
- f) Disponer de la información necesaria para elaborar un sistema estadístico de generación de datos sobre este tipo de residuos.
- g) Fomentar la reutilización de los residuos recuperados y el desarrollo e impulso del uso de dichos productos por las diferentes Administraciones.

<http://doe.juntaex.es/pdfs/doe/2011/4300/11040027.pdf>



# Normas resumidas para los autores de artículos

## *Brief paper's instructions for authors*

- Los artículos deberán ser originales e inéditos y no deben de haber sido enviados simultáneamente a otros medios de comunicación.
- Tendrán siempre preferencia los que versen sobre temas relacionados con el objetivo, cobertura temática y/o lectores a los que se dirige la revista.
- Todos los trabajos serán redactados en castellano (o inglés para autores de otra lengua) y deberán cumplir los siguientes requisitos:
  - Título en castellano e inglés de 80 caracteres máximo
  - Un breve resumen (Abstract), entre 150 y 300 palabras, en castellano e inglés.
  - Entre tres y cinco palabras clave (Key words) en castellano e inglés, que permitan identificar la temática del artículo
  - No deberían de tener más de aproximadamente 5.500 palabras, o 17 páginas formato A4 en fuente Arial 10 con interlineado simple (Consultar con DYNA extensiones superiores).
  - Bibliografía relacionada o referencias según normas DYNA en [www.revistadyna.com](http://www.revistadyna.com)
- Con el objeto de facilitar la “revisión entre pares”, el autor deberá asignar el código DYNA de 6 dígitos correspondiente a la temática del artículo, seleccionándolo de entre los códigos disponibles en la dirección de Internet: [www.revistadyna.com](http://www.revistadyna.com)
- Los originales se remitirán mediante nuestra página web (envío artículos), en formatos .DOC (msword), .RTF, o .TXT. Se recomienda una calidad mínima de 300ppp para las fotografías que se adjunten con el artículo. Se harán constar: título del artículo, nombre del autor, título académico, empresa o institución a la que pertenece, dirección electrónica, dirección postal y teléfono.
- Se someterán al Consejo de Redacción cuantos artículos se reciban, realizándose la “revisión entre pares” por los expertos del Consejo o los que éste decida. El resultado de la evaluación será comunicado directamente a los autores. En caso de discrepancia, el editor someterá el trabajo a un revisor externo a la revista cuya decisión será trasladada nuevamente al autor.
- Los autores aceptan la corrección de textos y la revisión de estilo para mantener criterios de uniformidad de la revista.
- La revista se reserva el derecho de no acusar recibo de los trabajos que no se ajusten a estas normas.
- Para mayor detalle sobre estas normas, por favor visite nuestra web <http://www.revistadyna.com> (en el apartado de “autores y evaluadores”).
- Paper will be original and unpublished and it must not be concurrently submitted for publication elsewhere.
- Preference will be given to articles on the main subject areas of the Journal.
- Articles should be written in articles (or English for authors of another language) and should fulfil the following requirements:
  - Title in both English and Spanish with a maximum length of 80 characters.
  - Brief Summary or Abstract, between 150 and 300 words, in Spanish and English.
  - Between three and five keywords in English and Spanish, that identify the paper theme.
  - Written text should not exceed 5.500 words, or 17 A4 format pages in 10 size arial font single-spaced (For longer lengths consult with DYNA)
  - Bibliographical references according to DYNA norms at [www.revistadyna.com](http://www.revistadyna.com)
- To facilitate the “peer review” process, the author will assign the six digits DYNA code corresponding to the paper thematic, selecting it between the codes available at the Internet address: [www.revistadyna.com](http://www.revistadyna.com)
- Papers should be sent by our web page (envío artículos), in .DOC (MSWord), .RTF, or .TXT format. It is recommended a minimum quality of 3000 ppp for the pictures enclosed in the article. These papers will include: Article title, author name, academic title, company or institution, email, correspondence address and telephone.
- All papers must pass the Editorial Board (EB) evaluation process. The “peer review” will be made by the Editorial experts or those that the EB decides. The evaluation result will be directly communicated to the author. In case of discrepancy, the publisher will refer the work to an external reviewer whose decision will again be transferred to the author.
- The authors accept the text correction and the style revision to maintain uniformity criteria for the magazine.
- The journal reserves the right not to accept articles which do not comply with said instructions.
- To find more details about these instructions, please visit our web page <http://www.revistadyna.com> (authors and referees section).

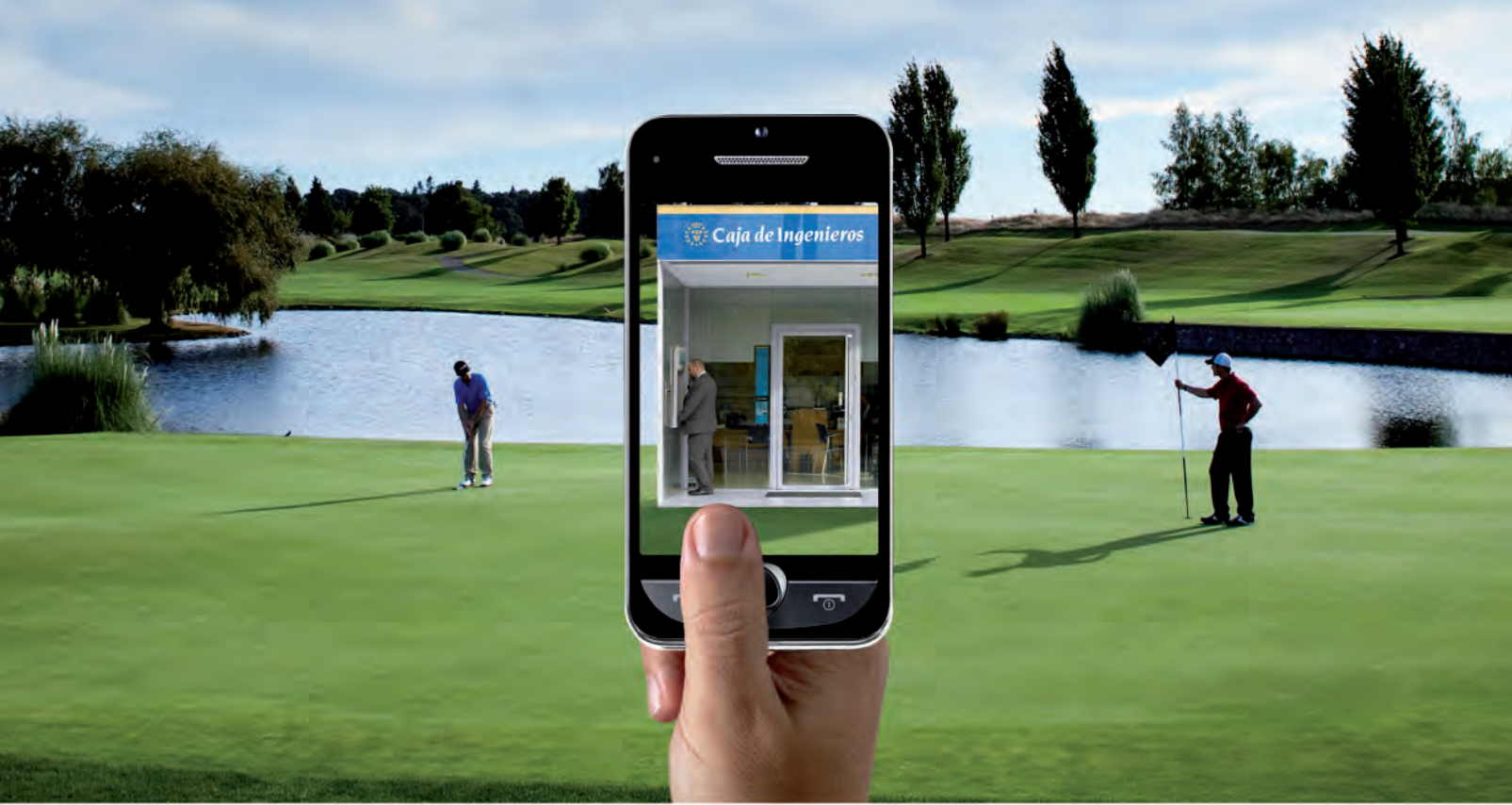
### COMO AYUDAR A DYNA VOTANDO POR SU PROYECTO EN CAJA NAVARRA

- Apoya a la revista DYNA sin ningún coste para ti.
- CAJA NAVARRA permite seleccionar a sus clientes el proyecto al que destinar los beneficios que generan sus operaciones en la entidad.
- Si tienes cuenta en CAJA NAVARRA, puedes ayudar a nuestra revista participando en la iniciativa “TU DECIDES, TU ELIGES” y seleccionando el proyecto de DYNA nº 17183.

[http://www.cajanavarra.es/es/tus-derechos/proyectos/cesta.htm?idp=17183&yearp=2012&utm\\_campaign=widget-tetd-elegir-es&utm\\_source=socialmedia&utm\\_medium=widget&utm\\_content=17183](http://www.cajanavarra.es/es/tus-derechos/proyectos/cesta.htm?idp=17183&yearp=2012&utm_campaign=widget-tetd-elegir-es&utm_source=socialmedia&utm_medium=widget&utm_content=17183)

La iniciativa 'Tú eliges: tú decides', con la que se denomina a la Obra Social de Caja Navarra, es el derecho de elección social que permite a los clientes elegir el proyecto al que destinar los beneficios que generan sus operaciones en la entidad. La Obra Social, a la que Caja Navarra destina cada año el 30% de sus beneficios, está íntegramente en manos de sus clientes.

A través de la 'Cuenta Cívica', Caja Navarra comunica a sus clientes cuánto dinero gana con ellos y cuánto dinero aportan a los proyectos sociales que han elegido. Este ejercicio de transparencia hacia los clientes también lo practican en la Banca Cívica las entidades sociales en sus actos de rendición de cuentas o en los blogs de la Comunidad de la Banca Cívica, donde les informan sobre cómo están desarrollando los proyectos y cómo emplean el dinero recibido. Y, por último, Caja Navarra reconoce a sus clientes el derecho a saber y a decidir dónde invierte Caja Navarra su dinero.



# Banca Móvil Caja de Ingenieros

## Tu oficina, donde quieras y cuando quieras

Imagina disponer de una oficina de Caja de Ingenieros abierta en cualquier lugar donde te encuentres y en cualquier momento del día o de la noche.

Esto es **BANCA Móvil**, el nuevo servicio gratuito que te permite realizar las operaciones más habituales donde quieras y cuando quieras desde tu teléfono móvil.

A través de un código de usuario y una clave de acceso, los mismos que utilizas cuando entras a **teleingenieros web** desde tu ordenador, **accederás a las 20 transacciones más utilizadas**, incluyendo consulta de saldo, movimientos, transferencias y compra/venta de valores.

Si deseas ampliar esta información puedes dirigirte a cualquiera de nuestras oficinas, llamar al **902 200 888** de **teleingenieros fono** o conectarte a **www.caja-ingenieros.es** de **teleingenieros web**.