

INNOVACIÓN EN LAS EMPRESAS

Enfoque metodológico

RED GLOBAL DE OPERACIONES

Modelo para su evaluación y mejora

IMÁGEN MÉDICA

Asignación de propiedades mecánicas

METALURGIA

Precipitación de martensita inducida por deformación

TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

Localización de activos soterrados

EVALUACIÓN DE LA RED DE CARRETERAS

Registro de situaciones potencialmente peligrosas

TRACCIÓN FERROVIARIA

Mantenimiento de los motores eléctricos

RELACIONES INTEREMPRESARIALES

La confianza como elemento clave



REDES NEURONALES

Predicción de la temperatura de contención primaria de central nuclear

MOTORES BRUSHLESS

Banco de ensayo automatizado

ERGONOMÍA

Caso de estudio de diseño de puestos



Precio por ejemplar. 31,20 €



POLITÉCNICA

"Ingeniamos el futuro"

CEPADE

**INDUSTRIALES
ESCUELA DE NEGOCIOS**

Universidad Politécnica de Madrid

PROGRAMAS MBA y MASTER ESPECIALIZADOS*

[Profesional y Executive]

Español o Inglés

- Presencial
- Semi Presencial
- On Line

* Títulos y Diplomas Propios de la UPM

Matrícula Abierta



On Line

[**www.cepade.es**](http://www.cepade.es)

Tel.: +34 91 456.27.95

infocepade@cepade.es

C/Dr. Federico Rubio y Gali, 11 28039 Madrid



Presencial y Semipresencial

[**www.ienpolitecnica.es**](http://www.ienpolitecnica.es)

Tel +34 91 336.41.58

info@ienpolitecnica.es

C/ José Gutierrez Abascal, 2 28006 Madrid

Instituciones colaboradoras:

- POLIMI, Politecnico di Milano (Italy)
- KTH - Royal Institute of Technology (Sweden)
- ESCP Europe Ecole Supérieure de Commerce de Paris (France)

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

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 Ruiz - 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 Izkue 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 Urueña Cuadrado** (Asociación León - León).

CONSEJO DE REDACCIÓN

Presidente: Luciano Azpiazú Canivell (Iberdrola - Bilbao)
Vicepresidente: Leopoldo Espolita Carreño (Asociación de Asturias - 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 Giro** (Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers - Paris, Francia), **Fernando Guíjarro 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), **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/ / 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
Instrucciones detalladas para los autores en la web: 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
Formato: 21 x 29,7 cm (A4)
D.L. BI-6-1958
ISSN 0012-7361
ISSN electrónico 1989-1490
SICI: 0012-7361(20110801)86:4<>1.0.TX;2-0
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 Elche, Universidad Rovira i Virgili, Universidad de Huelva.

ORGANIZACIONES COLABORADORAS

CEIT-IK4, Euskalit, Tecnalia, ITEC, ITE

ORGANIZACIONES AMIGAS DE DYNA

SP Mutualia

Miembro de:

- Council of Science Editors
- Asociación Española de Comunicación Científica

Suscripción anual Institucional

(Estos precios no incluyen el 4% de IVA)

España	140,00 €
Número suelto	30,00 €
Extranjero	199,00 €
Número para extranjero	38,00 €
Suscripción WEB ilimitada al archivo histórico	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 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)

Revista Impresa	Izda.	Dcha.
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	

Revista digital (<http://www.revistadyna.com>)

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

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.



366
DYNA hace 80 años

368
Noticias Breves

370
Sociedad e Ingeniería Industrial

374
Evolución

377
Aula DYNA

381
Noticias

390
Colaboraciones

481
Desarrollo Sostenible



397

ENFOQUE METODOLÓGICO PARA LA INNOVACIÓN EN EMPRESAS
METHODOLOGICAL APPROACH FOR INNOVATION IN ENTERPRISES

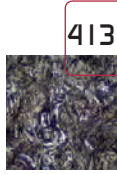
Vicente Chulvi, José Ruiz-López, Rosario Vidal



405

MODELO PARA LA EVALUACIÓN Y MEJORA DEL ROL ESTRATÉGICO DE PLANTAS PRODUCTIVAS. CASO DE UNA RED GLOBAL DE OPERACIONES
FRAMEWORK FOR EVALUATING AND UPGRADING THE STRATEGIC PLANT ROLE. CASE STUDY WITHIN A GLOBAL OPERATIONS NETWORK

Miguel Mediavilla, Ander Errasti, Rosario Domingo



413

PRECIPITACIÓN DE MARTENSITA INDUCIDA POR DEFORMACIÓN. CARACTERIZACIÓN DEL CONTENIDO DE MARTENSITA EN ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS
STRAIN-INDUCED MARTENSITE PRECIPITATION. MARTENSITE CHARACTERIZATION IN AUSTENITIC STAINLESS STEELS

María Fernández-Ludeña



418

DISEÑO DE UN BANCO DE ENSAYO AUTOMATIZADO PARA MOTORES BRUSHLESS
DESIGN OF AN AUTOMATED TEST BENCH FOR BRUSHLESS MOTORS

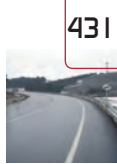
Alfonso Bachiller-Soler, Francisco De Paula García-López, Ramón Cano-González



424

LA CONFIANZA COMO ELEMENTO CLAVE EN LAS RELACIONES INTEREMPRESARIALES. UNA ESCALA DE MEDIDA
TRUST AS A KEY FACTOR IN THE ENTERPRISE RELATIONSHIPS. A SCALE OF MEASUREMENT

Manuel Expósito-Langa, Débora Nicolau-Juliá, Josep Capó-Vicedo



431

EVALUACIÓN DE LA RED DE CARRETERAS: UTILIZACIÓN DE UN VEHÍCULO INSTRUMENTADO PARA EL REGISTRO DE SITUACIONES POTENCIALMENTE PELIGROSAS
EVALUATION OF THE ROAD NETWORK: USE OF A MONITORING VEHICLE FOR THE RECORD OF POTENTIALLY DANGEROUS EVENTS

Pablo Luque-Rodríguez, Daniel Álvarez-Mántaras, Johan Wideberg



438

LOCALIZACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE ACTIVOS SOTERRADOS MEDIANTE GEORADAR Y PROCESAMIENTO DE IMAGEN
LOCATION AND IDENTIFICATION OF BURIED ASSETS BY MEANS OF GEORADAR AND IMAGE PROCESSING

Arantza Bereciartua-Pérez, Artzai Picón-Ruiz



448

LOS MOTORES ELÉCTRICOS DE TRACCIÓN FERROVIARIA. CARACTERÍSTICAS Y TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO DEL SISTEMA ELÉCTRICO
RAILWAY TRACTION ELECTRIC MOTORS. CHARACTERISTICS AND TECHNIQUES OF ELECTRIC SYSTEM MAINTENANCE

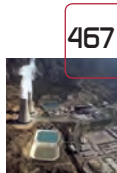
Marcelo Pérez-Alonso, Daniel Moriñigo-Sotelo, Óscar Duque-Pérez



456

MODELO DE DISEÑO ERGONÓMICO PARA PUESTOS DE TRABAJO EN PYMES. CASO DE ESTUDIO EN BARRANQUILLA, COLOMBIA
ERGONOMIC DESIGN MODEL FOR WORK STATIONS IN SMES. CASE STUDY: BARRANQUILLA (COLOMBIA)

Ángel León González-Ariza, Miguel Ángel Ruiz-Bacca



467

PREDICCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA CONTENCIÓN PRIMARIA DE UNA CENTRAL NUCLEAR MEDIANTE REDES NEURONALES
DRYWELL TEMPERATURE PREDICTION OF A NUCLEAR POWER PLANT BY MEANS OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Antonio Álvarez-Huerta, Rodrigo González-Míguez, David García-Metola, Álvaro Noriega-González



474

ASIGNACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN IMAGEN MÉDICA
MAPPING OF MECHANICAL PROPERTIES IN MEDICAL IMAGING

Alberto Higuera-Garrido, Pablo Pando-Cerra, Aquilino Osorio-Zapico, María Dolores García-López

LA HIDROGENACIÓN DE COMBUSTIBLES SÓLIDOS

“El creciente consumo mundial de combustibles líquidos, motivado desde la gran guerra por el auge del automovilismo y la aviación, ha creado una gran preocupación en todos los países desprovistos de yacimientos petrolíferos”. Esa razón de peso, lleva al autor a describir primero “el fenómeno del cracking que consiste en la descomposición por el calor y en gran número de métodos bajo presiones relativamente poco elevadas, las moléculas de los hidrocarburos de gran peso molecular”.

Con esa base, más el “gran progreso desarrollado por F. Bergius en Alemania de realizar el cracking por calentamiento bajo una atmósfera de hidrógeno a elevada presión”, se pasa a explicar cómo el mismo Bergius aplicó ese método a los carbones desde 1913, y F. Fischer y H. Tropsch lo han desarrollado a nivel industrial.

El artículo expone también las distintas variantes y resultados del método, con informaciones de distintos investigadores y del mismo autor en el Instituto del Carbón de la Universidad de Oviedo.

José Manuel Portierra

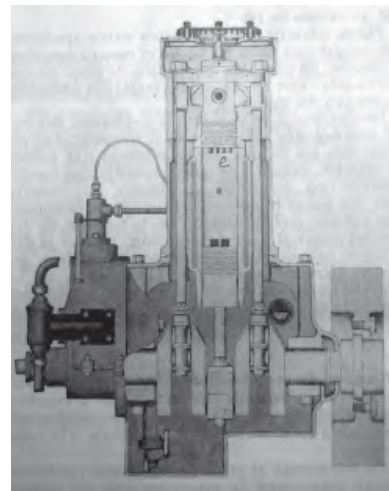
EL MOTOR DIESEL DE DOS TIEMPOS DE DON PEDRO SORRIGUIETA

Esta descripción técnica, reivindica las posibilidades de una innovación aportada por Pedro Sorriguieta, que en los anteriores decenios había sido destacado corredor de motocicleta⁽¹⁾: se trata de “un motor Diesel de dos tiempos, dos pistones opuestos y bomba de barrido unida al superior con inyección mecánica”.

Las dos directrices principales que han guiado al inventor han sido:

“El barrido lógico de abajo arriba para dificultar por la diferencia de densidades entre el aire de barrido y los gases calientes, la difusión de los dos y la simplificación del motor de combustión para hacerle más barato y más seguro”.

El prototipo tenía diámetro de cilindro de 95 mm y carreras de los pistones de 125 y 95 mm respectivamente, estando previstas las pruebas correspondientes por el autor del artículo en los laboratorios de la Escuela de Ingenieros Industriales de Bilbao.



Mario Martínez y R. de la Escalera

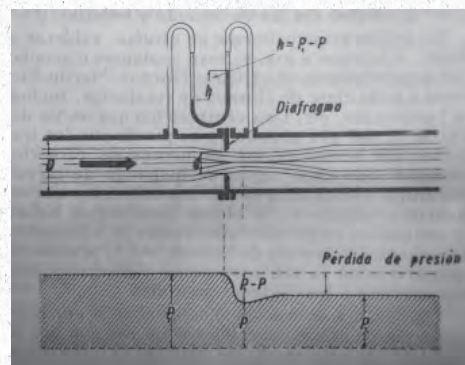
(1) En la carrera motociclista Bilbao-San Sebastián-Bilbao de 1914, Sorriguieta fue vencedor con el tiempo de 3 horas 52 minutos.

UTILIZACIÓN RACIONAL DEL GAS DEL TRAGANTE DE UN HORNO ALTO (Control y regulación)

En las acerías integrales es “continuo y obligado empeño... la reducción en su mayor grado posible el costo de la fundición obtenida por el horno alto”. Como además “el diagrama térmico de una fábrica metalúrgica muestra que el gas que sale por el tragante arrastra un 62% del calor total introducido por el combustible en el horno alto” está claro el ahorro a obtener si se utiliza por completo. Un cálculo considerando los precios de los carbones usuales y el uso de este gas, obtiene una reducción del 16% en el costo de los combustibles.

Sin embargo, “el enlace del centro depurador y distribuidor de gas con los distintos talleres que lo consumen”, requiere “el elemento esencial de la red, el acumulador de gas, para armonizar las oscilaciones de la producción con la irregularidad del consumo” y “una red de tuberías de grandes dimensiones” que para reducir su costo disponen de “un nuevo método de cálculo como tuberías aéreas... considerándolas como viga GERBER en la que las articulaciones corresponden a las juntas de dilatación”.

Son también de suma importancia los aparatos de control. “Para la medida del gas que fluye por tubería se emplean tan solo los aparatos de órgano de contracción”.



Francisco Millán

Vivimos en una situación de crisis económica grave. Basta con observar aquellos indicadores económicos que nos relacionan los crecimientos del Producto Interior Bruto y también la Balanza Comercial y los Índices de Paro. Recordemos algunos de ellos: la reducción del PIB en España fue del -3,7% en el 2009 y de -0,1 % en el 2010. Entretanto el promedio del crecimiento a nivel mundial llegó al 4,4% y en la zona euro de la UE fue del 1,6%. El índice de paro en nuestro país se sitúa en el 21,3% mientras que el promedio en la UE de los 27 está en el 9,5%. Nuestra balanza de pagos tiene un déficit que alcanza el 4,5% del PIB.

A esta situación hemos de añadir la de aquellos índices más difícilmente cuantificables, pero que nos dan un reflejo de la situación. Nos referimos al aspecto de la Bolsa de Trabajo de nuestros colegios y asociaciones profesionales: hemos pasado de un estado en el que las empresas tenían dificultades para hallar los ingenieros que necesitaban, a otra en la que los recién titulados o, peor aún, los que han visto el cierre de la empresa donde prestaban sus servicios, tienen grandes dificultades para encontrar un puesto de trabajo.

La crisis que vivimos tuvo su origen en una situación internacional determinada por la falta de garantías en el crédito que se inició en los Estados Unidos. En nuestro país esta crisis se acrecentó con el desplome del sector de la construcción y la subsiguiente caída del sector financiero. Hoy la mayoría de países del norte de Europa han superado ya la primera crisis, la mundial; la segunda, la que podríamos calificar de meridional, la específica de un país que priorizó la construcción sin suficientes garantías seguramente en detrimento de otros sectores, continúa afectándonos gravemente.

Ante esta realidad, como profesionales ¿qué podemos hacer? En primer lugar, corresponde a nuestra profesión -como hemos hecho desde que iniciamos los estudios de nuestra carrera- analizar las bases del problema. Estudiar a conciencia cuál es la realidad de hoy, con sus dificultades y también -quizá cueste más hallarlos- sus aspectos positivos. Este análisis debe alejarnos de un estado de pesimismo y de dejarse llevar, que en absoluto contribuirá a mejorar la situación.

En una situación de crisis son importantes las capacidades que cada uno pueda aportar, pero a buen seguro, son mucho más importantes las actitudes. En este sentido, ante un problema grave, posiblemente difícil o muy difícil, nuestra actitud debe ser positiva y dirigida a buscar la solución.

Hay unos aspectos que en absoluto podemos descuidar y que están hoy presentes en nuestra economía y lo estarán mucho más en el futuro inmediato: la internacionalización, la necesidad de innovación, la necesidad de crear empresa, la capacidad de emprender. Reforzar nuestra contribución a estos ámbitos será mejorar el estado de nuestro tejido industrial y por consiguiente de nuestra economía. El segundo y el tercero de ellos van íntimamente ligados a la cooperación con las universidades y los centros tecnológicos de investigación y desarrollo. Es una labor, la de relación y mejora del mutuo conocimiento entre universidades y empresa, que puede llevarse a cabo también en momentos de crisis.

La internacionalización puede ser la asignatura pendiente para algunos, quizá para aquellos que finalizamos los estudios hace ya muchos años, pero para los ingenieros más recientes es una realidad que han conocido y vivido. En estos momentos deben aprovecharse las experiencias vividas e iniciar nuevos caminos. Internacionalización significa también "mercado mundial" y ello lleva consigo la exigencia de un alto nivel de competitividad: la mejora de la competitividad nos lleva, entre otras cosas, de nuevo también a la innovación.

Tampoco debemos de olvidar las herramientas que tenemos al alcance de la mano. Nuestra revista DYNA y su reconocido prestigio internacional, ofrece a nuestra profesión una ventana al mundo para publicar nuestras experiencias y visión compartida de la presente situación económica y sus posibles soluciones.

Hemos de tener presente que en una situación de crisis, deben considerarse dos aspectos importantes: como nos desenvolvemos en ella haciendo los máximos esfuerzos para sobrevivir y de qué forma nos preparamos para afrontar la nueva realidad en el momento preciso en que la situación mejore. Puede ser útil recordar aquella cita atribuida a Edison "*We never invented anything of value, when we had enough time or money*" (*Nunca inventamos cosas valiosas cuando tenemos dinero y tiempo suficiente.*)



► HÍBRIDOS HIDRÁULICOS

El almacenaje de energía eléctrica en baterías por carga directa y por recuperación del frenado es la base de los actuales vehículos híbridos, que permiten recorridos solamente eléctricos y reducen considerablemente el consumo de combustibles.

Chrysler experimenta la segunda de estas opciones, la recuperación de energía del frenado por medio de un sistema hidráulico que bombea el fluido a un tanque comprimiendo el aire en su interior, de forma que esa compresión pueda ser utilizada para colaborar en la marcha y economizar combustible. El sistema puede ser más económico que los híbridos actuales que precisan complejos sistemas eléctricos y pesadas baterías de alto precio.

Queda por superar los problemas de ubicación de los tanques y de reducción del ruido inherente a los sistemas hidráulicos. Ya están en prueba en camiones y próximamente se instalarán en furgonetas.

► EL ALMACENAJE DE ENERGÍA

El cada vez mayor desarrollo de la generación eléctrica por medios discontinuos hace crecer la necesidad de componentes para su almacenaje. Hasta ahora el sistema turbina-bomba asociado a centrales hidráulicas es predominante y supone un 99% de la

capacidad mundial.

Sin embargo las nuevas tendencias de producción descentralizada junto con una distribución siguiendo los principios de las llamadas *smart grids* puede originar un creciente desarrollo de los almacenajes estacionarios (baterías, supercondensadores o volantes de inercia), de índole residencial o comunitario. A medida que la generación fotovoltaica se extienda, las baterías ion-litio pueden suponer una importante proporción de empleo, tanto nuevas como las retiradas de los vehículos híbridos para una segunda vida útil. Además, los mismos vehículos híbridos o eléctricos, en un general proceso de carga o descarga constituirán un medio no despreciable de almacenaje. Para hacernos una idea de esas magnitudes, una central fotovoltaica americana de 500 kW se asociará a un grupo de baterías subterráneo de 500 kW / 250 kWh.



► LAS ARENAS BITUMINOSAS DEL CANADA

Con una cotización del crudo por encima de los 85 \$ por barril, la explotación de arenas bituminosas presenta buena rentabilidad, siempre que el costo del gas natural, necesario para la licuefacción de los betunes que las impregnan y la obtención de la elevada cantidad de hidrógeno preciso para la destilación, sea suficientemente bajo.

En 2010 se produjeron alrededor de 1,5 millones de barriles de crudo procedente de esas explotaciones y, de seguir las cosas como en la actualidad,

esa cantidad se multiplicaría por 3 o por 4 en 2020.

Sin embargo, muchas veces se alzan contra este proceso de obtención dado su elevado impacto sobre el medio ambiente, no solo respecto a los suelos donde se practica, sino también por las cantidades de CO₂ y de metano emitidas durante el proceso: las primeras por la necesidad de calentamiento que precisan las tierras impregnadas y las segundas por el desprendimiento espontáneo que se genera durante la operación. Sería preciso investigar la aplicación de nuevos métodos de extracción y separación para cumplir con el necesario respeto medioambiental.

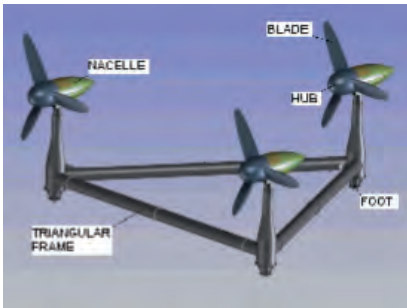
► EVOLUCIÓN DE LAS BATERÍAS

Hay una previsión deseable de que hacia el año 2030, los automóviles con electro-movilidad podrían suponer el 10% de la flota mundial.

Sin embargo ello exige un decidido avance de las investigaciones para conseguir nuevas generaciones de baterías que permitan ajustar el costo, aumentar la relación capacidad/peso y prolongar su vida útil.

Por ejemplo la alemana **BASF** tiene como objetivo conseguir una nueva de ion-litio capaz de recorrer 400 km con 200 kg de batería, actuando sobre los materiales del cátodo, actualmente de un óxido metálico de base cobalto. Los ensayos se dirigen a materiales combinados de níquel, cobalto y manganeso (NCM) que además son más económicos.

Para baterías de tercera y cuarta generación se trabaja en los prototipos de las llamadas litio-sulfuro, en la zona frontera con las pilas de combustible. Sin embargo aun presentan problemas de seguridad y duración que se espera resolver hacia 2020. También son objeto de investigación los electrolitos de transmisión de iones con materiales tipo gel, polímeros o incluso cerámicos.



► GENERADOR DE MAREAS

La británica **TIDAL ENERGY** ha instalado un generador de mareas de 1,2 MW en el estrecho Ramsey, entre la isla Ramsey y la costa de Pembrokeshire en Gales, para un período de prueba de 12 meses. El equipo generador, denominado *Deltastream*, se compone de tres turbinas de eje horizontal similares a los aerogeneradores que mueven los alternadores con las corrientes producidas por las mareas crecientes y menguantes. Están montadas sobre un marco tubular triangular de 30 m de lado que al incorporar automáticamente agua de lastre, se apoya en el suelo marino sin necesidad de anclaje.



► LOS RESIDUOS NUCLEARES

Algunos expertos han manifestado que gran parte de las radiaciones de

cesio-137 emitidas tras el accidente de Fukushima, eran procedentes del combustible nuclear gastado y almacenado en las piscinas que perdieron la necesaria refrigeración tras el terremoto y el tsunami del 11 de marzo.

Tras su uso en el reactor, las barras de combustible son introducidas en piscinas refrigeradas, disminuyendo su temperatura máxima entre 2 y 4 años; pero la ausencia de otros medios de almacenaje puede hacer prolongar esta situación indefinidamente. Por eso resulta de especial interés realizar en cuanto sea posible el encapsulado en contenedores de cemento, plomo y acero, que son refrigerados por la circulación natural del aire y resultan poco sensibles a sufrir daños. Varias centrales norteamericanas ya encapsulan sus residuos tras el enfriamiento en piscinas, reduciendo el riesgo de las mismas.

► CONTROL DE TANQUES

El Centro **TWI** británico, junto con los especialistas en ensayos no destructivos PI y varias empresas petroleras, han iniciado el Proyecto **TIM** (*Tank Integrity Management*), con el objetivo de desarrollar un sistema de sensores para detectar defectos estructurales y de corrosión en las zonas interiores de los tanques de almacenaje sin necesidad de vaciarlos, limpiarlos ni ingresar personas en ellos. Para ello se prevé aplicar las técnicas mejoradas de onda guiada ultrasónica de largo alcance (LRU), con sensores situados en el exterior de los tanques. La detección temprana de defectos es importante, pues los parques de almacenaje de productos petrolíferos son generalmente de gran dimensión y situados próximos a las costas y/o a zonas pobladas (www.timproject.co.uk).



► SUPERCONDUCTOR FINO Y FLEXIBLE

En el *National Institute of Standards and Technology* (NIST) americano se ha desarrollado el prototipo de un cable superconductor de elevada temperatura flexible, que con 6,5 mm de diámetro es capaz de transportar corrientes de 1.200 amperios.

El cable se forma arrollando una envoltura de flejes muy finos de materiales superconductores y llevando en el centro un núcleo de hilos de cobre. El refrigerante puede ser nitrógeno líquido o helio gaseoso para mantener el cable por debajo de 77°K y el material superconductor utilizado es de base gadolinio-bario-cobre.

Estos cables flexibles pueden ser utilizados en equipos que precisan elevadas intensidades de corriente para aplicaciones médicas o militares, pues su diámetro resulta la décima parte del necesario en conductores convencionales. Actualmente se trabaja en un cable de 7,5 mm de diámetro para transportar hasta 2.800 amperios.

Sociedad e Ingeniería

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

► SAR EL PRÍNCIPE FELIPE RECIBE EN AUDIENCIA A LOS GALARDONADOS CON LOS PREMIOS NACIONALES DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y A LA JUNTA DE DECANOS DEL CONSEJO GENERAL

El pasado 30 de Mayo los Presidentes del Consejo General y la *Federación de Ingenieros Industriales elevaron*

Con motivo de la entrega de los Premios, y después de ser recibidos por SAR el Príncipe Felipe en el Palacio de la Zarzuela, los galardonados y los miembros de la Junta de Decanos del Consejo General se desplazaron al Hotel *Palace*, en donde tuvo lugar un almuerzo a cuyos postres se hizo entrega de los galardones.



sus quejas a SAR el Príncipe por los injustificables experimentos que el Ejecutivo está realizando con la Profesión: haciendo desaparecer el visado profesional, promoviendo la diáspora de titulaciones y una confusión generalizada con denominaciones equivocadas, así como la propuesta de “Ingeniero único”, que pretende introducir la LSP.

Se puede acceder a la Intervención del Ilmo. Sr. D. Francisco-Javier Cobo Valeri en el siguiente enlace web: <http://www.revistadyna.com/dyna/documentos/contenidos/pdfs/201104ago/boletinfaie2.pdf#page=1>

► ENTREGA DE LOS 5º PREMIOS NACIONALES DE LA INGENIERÍA INDUSTRIAL

El Consejo General de Colegios Oficiales de Ingenieros Industriales creó los Premios Nacionales de Ingeniería Industrial en 2001 con motivo del sesquicentenario de la Ingeniería Industrial. Los Premios tienen carácter bienal y están destinados a reconocer a las personas, instituciones y empresas que hayan destacado en el ámbito de la ingeniería industrial y contribuido al prestigio de la profesión en España e internacionalmente.

Los premiados han sido:

Trayectoria Profesional:

Otorgado a: D. ALFONSO ENSEÑAT DE VILLALONGA



Alfonso Enseñat recibiendo el premio de manos del Presidente del Consejo General, Javier Cobo y de Pedro Hernández Cruz, Decano de Cantabria, Colegio proponente del galardonado

Contribución al Prestigio de la Ingeniería Industrial:

Otorgado a: D. JULIÁN MORENO CLEMENTE



Premiado: Julian Moreno Clemente Presidente-Delegado: delegación de Málaga del Colegio de Andalucía Oriental, José Antonio Aguado Cabarros Manuel Medina Teixeira como Vicepresidente de la Delegación

Proyecto de Ingeniería: Ampliación de la Refinería de Repsol-YPF en Cartagena

Otorgado a: TÉCNICAS REUNIDAS; FLUOR; HEYMO; FOSTER WHEELER; INTECSA INDUSTRIAL; INTECSA-INARSA; INITEC



Javier Cobo Valeri, Presidente del CGCOII (izquierda), Pedro Jimenez Monpean, Decano de la Región de Murcia (centro) y Andreu Punet de Repsol (derecha)

Empresa Innovadora (Premio Patrocinado por Fundación Caja de Ingenieros):

Otorgado a: GRUPO INDUSTRIAL MP MAC PUARSA



MP Mac Puarsa: Gonzalo de Madariaga (derecha) con Aurelio Azaña, Decano de Andalucía Occidental (izquierda)

Construcción Metálica: Escenario Iceberg para espectáculo de la EXPO 2008 de Zaragoza

Otorgado a: GRUPO IDOM



Ramón López, de IDOM, recibiendo el premio de manos del Decano del Colegio de Aragón y La Rioja, Salvador Domingo.

Para más detalles sobre los valores profesionales de los premiados, hacer clic en el siguiente enlace web:

<http://www.revistadyna.com/dyna/documentos/contenidos/pdfs/201104ago/boletinfaiie2.pdf#page=3>

Sociedad e Ingeniería

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

► LEY DE SERVICIOS PROFESIONALES

El Gobierno parecía mantener su compromiso de sacar adelante la Ley de Servicios Profesionales aunque, en las últimas semanas, no dejan de llegar mensajes contradictorios.

Por un lado el Ministro Jáuregui, en una intervención en la toma de posesión del Consejo General de la Ingeniería Técnica Industrial, manifestaba que no era probable que el Parlamento pudiera aprobar el Proyecto de Ley antes del verano, haciendo prácticamente imposible su aprobación en esta legislatura.

No obstante, a los pocos días, la Comisión Europea hacía pública una serie de “recomendaciones” de reformas, aún pendientes de ser abordadas en España, entre las que figuraba la “liberalización de los servicios profesionales”. Y eso, en manos de un Gobierno que ya ha dado sobradas muestras de confundir “liberalizar” con “desregular”, volvió a generar inquietud.

Para más información, hacer clic en el siguiente enlace web:

<http://www.revistadyna.com/dyna/documentos/contenidos/pdfs/201104ago/boletinfaie2.pdf#page=7>

► LOS INGENIEROS INDUSTRIALES EN LOS MEDIOS DE COMUNICACIÓN

Durante los últimos meses el Consejo General viene realizando una exhaustiva labor de comunicación sobre los diferentes asuntos que afectan a los intereses de la profesión.

Para más información, hacer clic en el siguiente enlace web:

<http://www.revistadyna.com/dyna/documentos/contenidos/pdfs/201104ago/boletinfaie2.pdf#page=10>

► CREACIÓN DEL ORGANISMO DE CERTIFICACIÓN DE PERSONAS (OCP)

El pasado 1 de Octubre de 2010 se celebró una reunión de los representantes de los distintos colegios que componen el Consejo General para analizar las perspectivas de futuro de nuestras instituciones dentro del nuevo marco establecido por la entrada en vigor del RD 1000/2010, por la errática implantación de las nuevas titulaciones de “Bolonia”, y por la amenaza de una ley de servicios profesionales que equipare a todas las ingenierías horizontal y verticalmente, además de eliminar las reservas de actividad.

Con este horizonte se consideró estratégico que desde el Consejo se desarrollara un sistema de Acreditación de Ingenieros en similitud a lo existente en otros países, fundamentalmente anglosajones. Este sistema de acreditación (en adelante certificación, termino más ajustado en nuestro país) garantizaría que los profesionales que lo ostentaran poseen un nivel profesional acorde con las expectativas que la sociedad tiene para un ingeniero.

Para más información, hacer clic en el siguiente enlace web:

<http://www.revistadyna.com/dyna/documentos/contenidos/pdfs/201104ago/boletinfaie2.pdf#page=13>

Estructura funcional de la OCP:

El **Comité de Estándar** genérico define el esquema de certificación profesional y de él dependen el resto de esquemas específicos (cuando se desarrollen los esquemas específicos).

El **Comité de Partes** integra a las partes interesadas y vela por la independencia e imparcialidad. De él depende el comité de apelaciones y garantías.

El **Comité de Certificación** es el responsable de emitir los certificados correspondientes en base al dictamen del comité de evaluación.

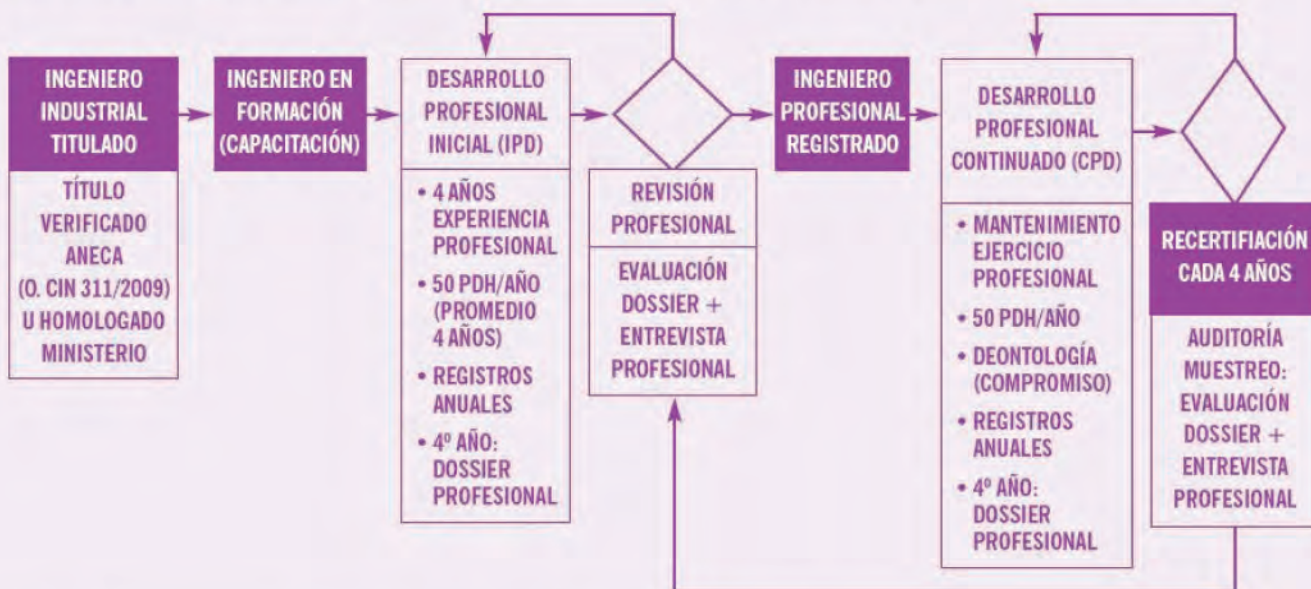
Los miembros de estos comités no tienen porqué formar parte de la plantilla de la OCP, sino que pueden conformarse con expertos externos, representantes de los Colegios y del Consejo, representantes de la Administración, etc.



Ingeniería Industrial

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

ESQUEMA GENERAL Esquema del procedimiento de Certificación del Ingeniero Industrial Profesional



Para cada esquema específico se adecuará el procedimiento a las necesidades concretas.

▶ EL DECANO DE MURCIA NOMBRADO DIRECTOR GENERAL DE INDUSTRIA

Nuestro hasta ahora Decano en la Región de Murcia, Pedro Jiménez Mompeán, acaba de ser nombrado Director General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. Le deseamos grandes éxitos en esta nueva etapa de gestión política, confiando en que desde este nuevo puesto contribuya a dinamizar la industria y la profesión en la Región de Murcia y que, como miembro del Consejo de Coordinación de Seguridad Industrial del Ministerio de Industria y las Comunidades Autónomas, promueva actuaciones para intentar armonizar la caótica política industrial que impera en España.

▶ LEGISLACIÓN

En el enlace siguiente se destacan las últimas novedades de carácter legislativo adoptadas tanto por la Administración General del Estado como por la Unión Europea, siendo así publicadas en el Boletín Oficial del Estado y Boletines regionales.

<http://www.revistadyna.com/dyna/documentos/contenidos/pdfs/201104ago/boletinfaie2.pdf#page=16>

▶ OPOSICIONES, CONCURSOS Y BECAS

En el enlace siguiente se presentan algunos de los Organismos Públicos que periódicamente, convocan plazas y conceden ayudas que pueden resultar de interés para nuestro colectivo.

<http://www.revistadyna.com/dyna/documentos/contenidos/pdfs/201104ago/boletinfaie2.pdf#page=18>

▶ CURSOS DESTACADOS

En el enlace siguiente se refieren las acciones formativas más destacadas realizadas por los Colegios, en los meses de abril, mayo y junio, de las que hemos tenido noticia, a través de las páginas Web correspondientes.

<http://www.revistadyna.com/dyna/documentos/contenidos/pdfs/201104ago/boletinfaie2.pdf#page=20>

¿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.

NUEVO SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR DE DOS EJES BASADO EN EL MECANISMO DE BIELA-MANIVELA

José Manuel Palomar-Carnicero	(Dr. Ing. Industrial – U. de Jaén)
Pedro Casanova-Peláez	(Dr. Ing. Industrial – U. de Jaén)
Fco. Alberto Díaz-Garrido	(Dr. U. Sheffield – U. de Jaén)
Fernando Cruz-Peragón	(Dr. Ing. Industrial – U. de Jaen)
Rafael López-García	(Dr. Ing. Industrial – U. de Jaen)

Publicado en DYNA (noviembre 2009)

RESUMEN DEL ARTÍCULO ORIGINAL

La energía solar fotovoltaica en los últimos tiempos se ha convertido en uno de los recursos energéticos renovables de mayor auge en España. Sin embargo, uno de sus principales problemas es el alto coste de los paneles solares fotovoltaicos en relación a la cantidad de energía que producen, lo que fuera de marco regulador actual puede inducir a cuestionar la rentabilidad de este tipo de instalaciones. Estudios previos han desvelado que un diseño mecánico optimizado, junto con un sistema electrónico de seguimiento robusto y altamente fiable, puede llegar a conseguir aumentos en la captación solar superiores al 30 % de media con respecto a sistemas fotovoltaicos sin seguimiento, con un incremento pequeño en el coste total de la instalación. En este trabajo se presenta un prototipo de seguidor con un novedoso diseño cinemático, basado en un mecanismo biela- manivela con accionamiento hidráulico. Este diseño ha permitido optimizar aspectos tales como la simplicidad y robustez mecánica, la fiabilidad de funcionamiento o el mantenimiento del sistema, entre otros. Los resultados obtenidos son altamente satisfactorios y prometedores.

COMENTARIO ACTUAL

José Manuel Palomar-Carnicero (Dr. Ing. Industrial – U. de Jaén)

El prototipo desarrollado surge como consecuencia de un contrato de transferencia de resultados de la investigación, suscrito entre la Universidad de Jaén y la empresa Proensol Seguidores SCA. En el citado artículo se presentaron algunos resultados preliminares relacionados con el mecanismo de giro ideado, el sistema de accionamiento y el sistema de control de posición implementado, así como algunos datos de carácter cuantitativo relacionados con las pruebas de durabilidad realizadas sobre el prototipo.

Como resultado más relevante derivado de este proyecto cabe destacar la generación de una patente a nivel nacional, que en la actualidad está en proceso de extensión a otros países de la Unión Europea. Los derechos de la citada patente fueron cedidos en exclusividad a la empresa Proensol Seguidores SCA para su explotación, con una pequeña participación de la Universidad de Jaén durante la venta de las 1.500 primeras unidades.

Con posterioridad a la finalización del prototipo, la empresa Proensol Seguidores SCA se ocupó de la industrialización del mismo para su posterior venta y distribución, desarrollando un sistema comercial para una potencia pico de 17,5 kW.



Finalizada la colaboración entre el grupo Ingemer TEP-250 (Ingeniería Mecánica y Energética) de la Universidad de Jaén y la empresa Proensol Seguidores SCA, desde el grupo de investigación se ha seguido trabajando sobre temáticas relacionadas con el aprovechamiento de la energía solar y otras fuentes de energía de carácter renovables. Esto se pone de manifiesto a través de otras patentes surgidas desde el grupo en esta línea de trabajo, como es el caso del "Sensor hemisférico de radiación solar", el cual permite obtener de forma estática medidas de radiación para distintas orientaciones e inclinaciones de forma simultánea, o el desarrollo de un sistema de seguimiento de dos ejes basados en motores paso a paso para la medida de la radiación proveniente de distintos puntos de la bóveda celeste.

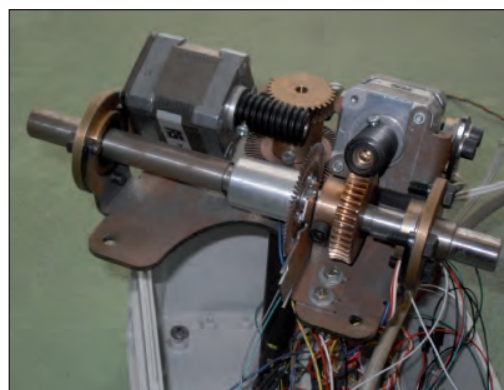
Otra de las líneas en las que se ha trabajado intensamente es el análisis de implantación de huertos solares en plantaciones de olivos como vía alternativa para el aprovechamiento energético del olivar.



En la actualidad el grupo de investigación Ingemer, aparte de en las líneas previamente descritas, trabaja en otros temas de notable actualidad relacionados con el aprovechamiento energético como es el caso del secado de orujo, la refrigeración por absorción o el aprovechamiento de la geotermia en aplicaciones industriales.



Sensor hemisférico de radiación solar



Miniseguidor solar con motores paso-a-paso para colocar en actuales paneles estáticos.

3ª edición de Noviembre 2011 a Julio 2012



Universidad
Carlos III de Madrid
Instituto Pedro Juan de Lastanosa

UC3M *cei*
CAMPUS DE EXCELENCIA
INTERNACIONAL



Máster en: Ingeniería de Seguridad frente al Fuego

90% a Distancia.

Información y Becas:

www.masterfuego.com

isf@ceaes.uc3m.es

Av. Universidad, 30 - 28911 - Leganés

Tfnos.: +34 68 920 4191

+34 91 624 8775 / 8402

Colaboradores:

AIRBUS MILITARY

CAF renfe

opci clima

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACION

Ciemat
Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas

TECRESA
PROTECCIÓN PASIVA

eee SA.
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
EMPRESA ESPAÑOLA DE ELECTRONICA S.A.

adif

COFIS

Afsb
fundacionentabarras

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

LOM

EM
Comunidad de Madrid
www.madrid.org

REPSOL
BUTANO

Marijoff
HI-FOG

dokei RE
zitrón



Máster en Ingeniería de Seguridad frente al Fuego



@masterfuegouc3m

UNA MEJORA DE PROCESO POR TÉCNICAS DE SIMULACIÓN DISCRETA: REDUCCIÓN DE “MURA” (1ª PARTE)

Julio César Puche-Regaliza

(Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad
de Valladolid).

José Costas-Gual

(Fundación Parque Científico de la Universidad de
Valladolid).

1. INTRODUCCIÓN

Las líneas de fabricación que forman parte de un sistema productivo están compuestas por un conjunto finito de estaciones de trabajo y de tareas que tienen asignado un tiempo de proceso y un conjunto de relaciones de precedencia que especifican el orden de proceso permitido de dichas tareas. Estas líneas de fabricación se ven afectadas por numerosos problemas de eficiencia. Siguiendo la terminología del *Toyota Production System*, los problemas de eficiencia se denominan desperdicio y se clasifican en tres grandes categorías según sea su naturaleza: (1) MURI, que agrupa aquellos problemas que atentan contra la estabilidad de las operaciones generando un alto nivel de agobio y una pérdida de motivación; (2) MUDA, que es un término muy general en el que englobamos la sobreproducción, el sobre-proceso, el exceso de inventarios, los transportes, los movimientos de los operarios y un largo etcétera de despilfarro esencial, es decir, lo que ocurre cuando estamos cumpliendo los estándares operacionales; y (3) MURA, que significa falta de balance o mal equilibrio de las cargas de trabajo en las diferentes estaciones de dicha línea de fabricación [9].

La ausencia de MURI, MUDA y MURA es una utopía, pues supondría un flujo optimizado de tal modo que agotáramos toda la capacidad instalada entregando cada producto al ritmo exacto de la demanda de los clientes. Por este motivo, *Toyota Production System*, que es un sistema de fabricación modelo, incorpora la filosofía KAIZEN¹

¹ El término japonés KAIZEN significa mejora continua progresiva y ordenada. La filosofía KAIZEN establece un desafío permanente al “status quo”, de forma que inspira a las personas a cooperar para la búsqueda de un ideal de perfección inalcanzable, pero al que nos vamos aproximando una y otra vez en cada ciclo PDCA. Adoptar la filosofía KAIZEN supone la continua reducción de los 7 tipos de desperdicio que siempre existen en toda cadena de valor. Además, supone apostar por una organización que aprende, que se ocupa de una forma estructurada de la capacitación permanente a todos los niveles, y que promueve una actitud de pensamiento crítico. Precisamente es esa actitud de pensamiento crítico la que busca no sólo eliminar el desperdicio evidente (como la chatarra, el retrabajo, etc.), sino el desperdicio

(mejora continua), cuyo efecto es la reducción permanente del desperdicio esencial (inherente al estándar del proceso) [9].

Es posible demostrar, mediante técnicas de simulación discreta, el efecto favorable que la reducción de MURA provoca sobre la capacidad disponible de una línea de fabricación y como consecuencia en la productividad de la cadena de valor. Nos centramos por lo tanto en el problema de un mal equilibrado de las líneas de fabricación (ALBP: *Assembly Line Balancing Problem*). Básicamente, este problema consiste en asignar las tareas a la secuencia ordenada de estaciones, de tal manera que se satisfagan las relaciones de precedencia y se optimice una función objetivo, como por ejemplo, alcanzar una explotación óptima de la capacidad disponible en dichas líneas de fabricación [2] [6].

En primer lugar, vamos a justificar la utilización y mostrar los conceptos generales de las técnicas de simulación discreta. Con esa base, será posible desarrollar el modelo de un sistema real que nos permita simular su comportamiento y como consecuencia confirmar o refutar la hipótesis de partida, es decir, si efectivamente, la reducción de MURA en las líneas de fabricación provoca un efecto favorable en la capacidad disponible. Las conclusiones nos indicarán líneas de trabajo futuras a seguir.

2. TÉCNICAS DE SIMULACIÓN DISCRETA.

Para simplificar, diremos que existen dos caminos para llevar a cabo el estudio de un sistema. O bien se experimenta con el propio sistema, o bien se experimenta con un modelo del sistema. Dicho modelo puede ser un modelo físico o un modelo matemático en el que encontramos un conjunto de supuestos, estructurales y cuantitativos, acerca del modo en el que el sistema trabaja. Desde un modelo matemático podemos alcanzar una solución analítica o desarrollar un modelo de simulación o conjunto de algoritmos software que imitan la conducta del sistema real, permitiéndonos observar su conducta (características relevantes) a lo largo del tiempo. Por último, los modelos de simulación pueden dividirse en modelos de simulación continua y modelos de simulación discreta en función del sistema que queramos simular. El primer caso, contiene variables preponderantemente de tiempo continuo, que pueden cambiar en cualquier momento. Los cambios se expresan mediante ratios empleando ecuaciones diferenciales y los resultados se obtienen en el largo plazo. Por otra parte, la simulación de sistemas discretos, contiene variables preponderantemente de tiempo discreto, que pueden cambiar en momentos discretos de tiempo. Interesa el seguimiento de los cambios de estado del sistema como consecuencia de la

esencial (que es el que ocurre cuando hacemos las cosas bien a la primera, de acuerdo con el estándar vigente).

ocurrencia de sucesos o eventos. Las ecuaciones del modelo son las relaciones lógicas que determinan la ocurrencia de un suceso o evento [1] (Figura 1).

La simulación se utiliza como paradigma para analizar sistemas complejos. Se aconseja su aplicación por ejemplo, cuando no existe una completa formulación matemática del

En cualquier caso, debemos tener claro que la simulación no resuelve los problemas por sí misma, sino que ayuda a identificar los problemas relevantes y evaluar cuantitativamente las soluciones alternativas. Permite responder a preguntas del tipo ¿qué pasaría en el sistema si se hiciera tal o cual cosa?, desarrollar sistemas que necesitan

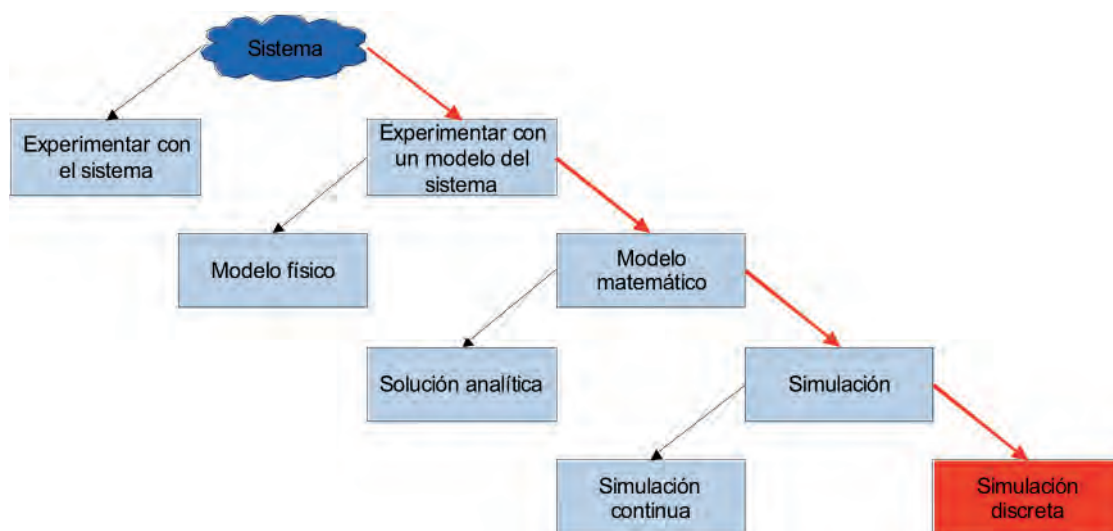


Figura 1: Estudio de la conducta de un sistema real (basado en [8])

problema (líneas de espera, problemas nuevos, etc.), cuando el sistema aún no existe (aviones, carreteras, etc.), cuando es necesario desarrollar experimentos pero su ejecución en la realidad es difícil o imposible (armas, medicamentos, campañas de marketing, etc.), cuando se requiere cambiar el periodo de observación del experimento (cambio climático, migraciones, población, etc.) o cuando no se puede interrumpir la operación del sistema actual (plantas eléctricas, carreteras, hospitales, etc.). Por el contrario, es desaconsejable su utilización cuando el desarrollo de la simulación es costoso comparado con sus beneficios o cuando la simulación es imprecisa y no se puede medir su imprecisión (el análisis de sensibilidad puede ayudar) [8].

Ante esta situación, parece clara la justificación de la utilización de técnicas de simulación discreta en este trabajo, apoyándonos además en la mejora de los ratios rendimiento-precio de los computadores y en los avances en la potencia, flexibilidad y facilidad de uso de programas informáticos de simulación. Estos avances han conducido a una mayor utilización de la simulación frente a otros métodos tradicionales en investigación de operaciones como los análisis estadísticos, las series temporales, la programación lineal, la programación no lineal, las redes PERT/CPM, la teoría de inventarios o la teoría de colas. Este incremento de su utilización a lo largo de los años se ve reflejado por una serie de ventajas que superan claramente a los inconvenientes que produce [8] [1].

estar en una situación bajo control, etc. No habrá ningún daño en el sistema real y la libertad para probar cualquier idea en el modelo puede descubrir alternativas atractivas que no habríamos sido capaces de poner en marcha con el sistema real. Por lo tanto, en esta forma de estudiar un sistema real, partiremos del propio sistema real y de un sistema simulado. El sistema simulado imita las operaciones del sistema real sobre el tiempo [8].

3. VALIDACIÓN DEL EFECTO FAVORABLE DE LA REDUCCIÓN DE MURA EN LAS LÍNEAS DE FABRICACIÓN SOBRE EL INCREMENTO DE LA CAPACIDAD DISPONIBLE²

Vamos a intentar validar el efecto favorable de la reducción de MURA en las líneas de fabricación sobre el incremento de la capacidad disponible. Para ello emplearemos técnicas de simulación discreta, lo que nos permitirá estudiar la conducta del sistema de producción antes y después de aplicar dicha reducción sin someternos al coste experimental que supondría una experimentación en la realidad.

² Aunque el caso está inspirado en un sistema real, todos los datos han sido alterados para proteger su confidencialidad.

De manera resumida, el estudio de un sistema real mediante técnicas de simulación discreta, nos obliga en primer lugar a construir y verificar un modelo de simulación y en segundo lugar, a analizar diferentes escenarios alternativos con el modelo construido. En la Figura 2, podemos ver de manera detallada todas las etapas necesarias para completar este tipo de estudios [1].



Figura 2: Etapas del estudio de un sistema real mediante técnicas de simulación discreta (basado en [1])

A continuación, desarrollaremos las etapas señaladas en color rojo (Figura 2) en diferentes subpartados intentando

confirmar la hipótesis de partida: $H_A =$ La reducción de MURA en las líneas de fabricación, provoca un efecto favorable sobre la capacidad disponible. Omitiremos el resto de etapas en este trabajo.

3.1. Cuaderno de cargas

En esta etapa definimos el sistema que queremos estudiar. Para ello, en primer lugar elaboramos un esquema del proceso a alto nivel, obteniendo así una primera perspectiva global. Este esquema nos permitirá definir los objetivos del sistema, sus fronteras, su alcance y sus limitaciones. A continuación examinamos las preocupaciones de los clientes internos y externos del sistema y por último definimos una serie de indicadores cuantitativos que nos permitan evaluar dichas preocupaciones [1].

El sistema a estudio (universo del problema) (Figura 3) es una línea de fabricación de piezas discretas. En este trabajo modelaremos una versión simplificada, dos máquinas de ensobrado (máquinas que forman un sobre en cuyo interior está una placa de plomo) vierten cada una de ellas sobre una cinta de transporte. Una máquina de soldadura se alimenta (aguas abajo) desde una tercera cinta de transporte. El diseño es una clásica disposición en V, en la que las máquinas de ensobrado vierten cada una de ellas por arriba de un vértice de la V y el flujo se acumula en el valle de la V, desde donde se alimenta la máquina de soldadura. Las máquinas de ensobrado hacen un trabajo equivalente y permutable de una a otra, pero son de diferentes tecnologías. La máquina de ensobrado#1 es más antigua, por lo que conviene trabajar con ella estableciendo tiempos de ciclo más largos para prevenir atascos (fallos por el arrastre de placas en los rodillos a alta velocidad). Por su parte, la máquina de soldadura es el cuello de botella de toda la línea de fabricación. Además es el activo más caro de la línea.

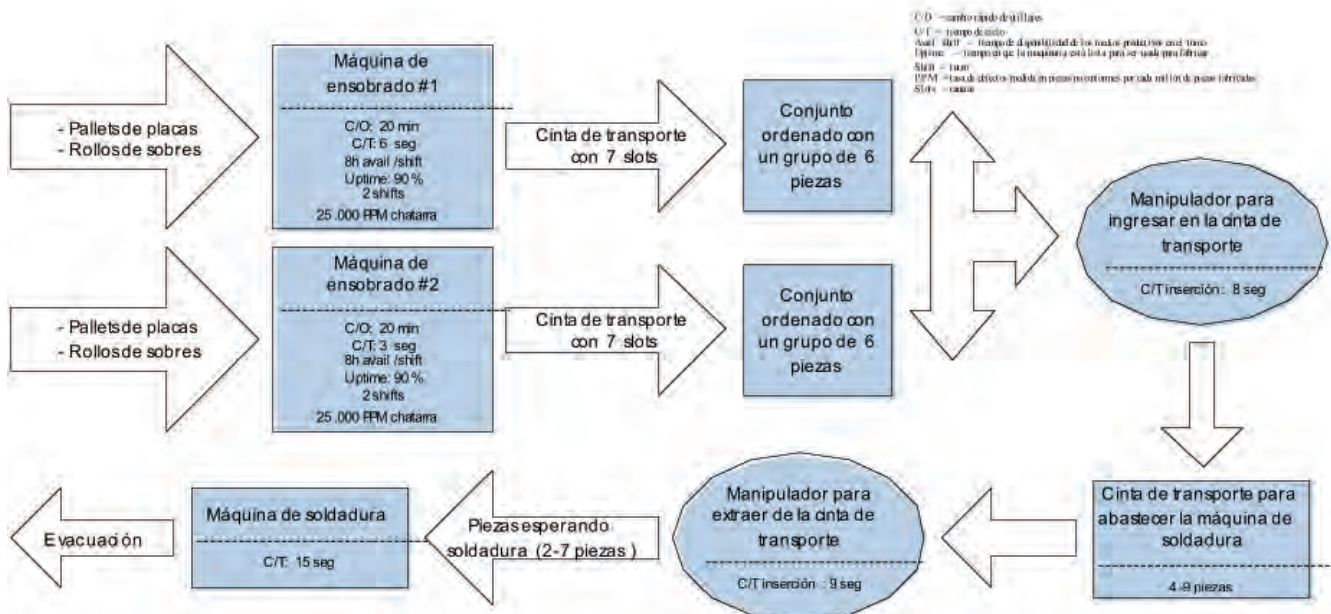


Figura 3: Esquema del proceso a alto nivel (elaboración personal)

Como hemos dicho, la máquina de ensobrado#1 es más lenta, tarda 6 segundos en completar una pieza, por lo que tardará $6 * 6 = 36$ segundos en completar un conjunto ordenado de 6 piezas. Por su parte, la máquina de ensobrado#2, más moderna y rápida, tarda 3 segundos por pieza, luego $3 * 6 = 18$ segundos. Por lo tanto, entre las dos máquinas, podrán ingresar $1,67 + 3,34 = 5,01$ conjuntos ordenados de 6 piezas por minuto en la cinta de transporte. Por su parte, el ritmo de consumo de la máquina de soldadura (aguas abajo) es de $60 / 15 = 4$ conjuntos ordenados de 6 piezas por minuto.

Una vez situado el universo del problema, examinamos las preocupaciones de los clientes internos y externos de esta línea de fabricación de piezas discretas. Vamos a suponer que hemos seleccionado las siguientes CTS (*critical-to-customer satisfaction*), es decir, aquellas características que preocupan a las personas:

- Maximizar el flujo que atraviesa la máquina de soldadura. Queremos explotar la capacidad de esta máquina al máximo.
- Minimizar los problemas de atascos en la máquina de ensobrado#1. Queremos dosificar el ritmo de las máquinas de ensobrado explotando el ritmo de la máquina de ensobrado#2 (la más rápida) a su máximo. De este modo, podemos dejar la máquina de ensobrado#1 al menor ritmo posible, siempre que sea suficiente para mantener el *takt time*³ en el cuello de botella.

La siguiente tarea, una vez seleccionados los CTS, es asociarlos a diferentes indicadores de gestión cuantitativos (métricas). Estas métricas o KPI's (*Key Performance Indicator*), nos permitirán estudiar el rendimiento del sistema.

- Recuento del volumen de producción (unidades producidas).
- Medición del tiempo que hemos tardado en producir dicho volumen de producción (calculado en *takt times*).

Para demostrar la hipótesis de partida (apartado 3), emplearemos como función objetivo el rendimiento del sistema, que evaluaremos a través del indicador:

MU (*Machine Utilization*) = recuento del volumen de producción / medición del tiempo que hemos tardado en producir dicho volumen de producción (calculado en *takt times*). El óptimo de este indicador es alcanzar el 100%.

3.2. Recolección de datos

Para abordar el ejercicio de simulación recopilamos datos de la realidad con el fin de determinar la situación de partida, obteniendo las leyes de llegada de los eventos al sistema y de los tiempos de servicio de las estaciones de

valor añadido, de los canales de transporte, etc. [1]. Para ello, se diseñan procedimientos y formularios normalizados para la recogida de datos [3] y se lleva a cabo dicha recogida de datos empleando técnicas de muestreo [5], ofreciendo así una aceptable consistencia científica y una aceptable validación de los datos de entrada. Para profundizar en temas relacionados con control estadístico de proceso utilizado a lo largo de este trabajo puede consultarse [10].

En primer lugar, consideramos como fuente de datos la demanda derivada desde el cliente externo para las piezas que producimos en la cadena de valor (línea de montaje). La demanda externa llega granulada en periodos de tiempo diarios. Tomamos la explosión que hace el MRP (*Material Requirements Planning*). Los datos obtenidos para la demanda derivada y los resultados del procesamiento de la muestra permiten estimar la ley de distribución asociada a este evento del sistema.

En segundo lugar, la estación de trabajo. Elegimos el *break event*, es decir, el evento que vamos a observar para pulsar el cronómetro en cada ciclo y así medir la duración del ciclo como el tiempo entre dos *break event* consecutivos. Siempre teniendo en cuenta una situación de régimen permanente, lo que significa no incluir en el estudio los casos en que la muestra está viciada por un evento extraño al proceso. Los datos obtenidos para el tiempo de ciclo de una estación de trabajo medido en minutos y los resultados del procesamiento de la muestra para estimar la ley de distribución asociada a este evento del sistema.

De esta manera, demostramos que los datos recogidos se ajustan a determinadas leyes de distribución que serán las empleadas en el modelo de simulación. En particular, para los ejemplos mostrados, tanto la demanda derivada como el tiempo de ciclo de la estación de trabajo puede ser estimada mediante una ley de distribución Normal.

(Concluirá en el próximo número)

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Banks J, Carson JS, Nelson BL. (1995). *Discrete Event Systems Simulation*. 2nd edition. Prentice-Hall.
- [2] Baybars I. (1986). "A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem". *Management Science*. August. Vol. 32 N° 8 p. 909-932.
- [3] Bicheno J. (2002). *The quality 75: Towards Six Sigma performance in service and manufacturing*. PICSIE Books.
- [5] García-Pérez A. (1992). *Estadística aplicada: Conceptos básicos*. Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- [6] Ghosh S, Gagnon R. (1989). "A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems". *International Journal of Production Research*. April. Vol. 27 N° 4 p. 637-670.
- [8] Kelton D, Sadowski R, Sturrock D. (2004). *Simulation with ARENA*. 3th edition. McGraw-Hill.
- [9] Liker J, Meier D. (2006). *The Toyota Way Fieldbook*. McGraw-Hill.
- [10] Thompson J, Koronacki J. (2002). *Statistical Process Control: The Deming Paradigm and Beyond*. Second Edition. Chapman and Hall/CRC.

³ Representa el intervalo de tiempo en que debemos producir una unidad para alcanzar el ritmo de la demanda del cliente. Si el tiempo de producción por jornada son 800 minutos y la demanda son 400 piezas, entonces el *takt time* es de 2 minutos por pieza.

La revista de Ingeniería DYNA duplica su factor de impacto en el informe JCR del año 2010

Fuente: Thomson-Reuters

- Thomson-Reuters acaba de publicar su Informe *Journal Citation Reports* del año 2010, donde aparecen los factores de impacto y citaciones de las revistas científicas más prestigiosas del mundo.
- DYNA mejora su Factor de Impacto un 120% con respecto al del año pasado.
- DYNA se posiciona como la revista de ingeniería general en español, con mayor número de citas.

El Factor de impacto es una medida de la importancia e influencia de una publicación científica y se calcula en función del número de veces que sus artículos son citados por otras revistas de prestigio.

Los datos publicados por el informe JCR del año 2010 atribuyen a DYNA un Factor de Impacto de 0,137 y un número de citas recibidas de 37. De esta forma, DYNA pasa a ser la revista en español con mayor número de citas en el grupo de ingeniería multidisciplinar de *Science Citation Index Expanded*.

El Factor de Impacto se calcula teniendo en cuenta 2 años de publicación de una revista. Su valor se obtiene al dividir el número de citaciones entre el número de artículos publicados. Por ejemplo, el actual Factor de Impacto del año 2010 es el número de citaciones que han recibido los artículos de la revista en los años 2008 y 2009 dividido entre el número de artículos publicados en ese mismo periodo (2008-2009).

A pesar del viejo y permanente debate sobre la relación existente entre el número de citas y la calidad editorial de las publicaciones seriadas, hoy en



día el Factor de Impacto publicado por Thomson-Reuters, sigue siendo el parámetro más fiable para otorgar prestigio e influencia a una revista científica. ■

ISI Web of KnowledgeSM

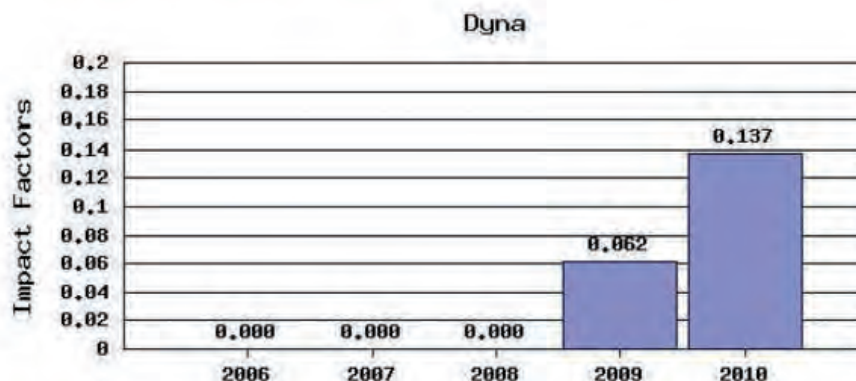
Journal Citation Reports[®]



2010 JCR Science Edition

Impact Factor Trend Graph: Dyna

Click on the "Return to Journal" button to view the full journal information.



9 al 11 de Noviembre de 2011



UNIVERSITAT
POLITÀCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

CEMACAM · Parque Natural Font Roja · Alcoi (Alicante)

- Estudios y tratamientos de contaminación en agua y suelo.
- Reciclaje de materiales y gestión de residuos.
- Nuevos materiales de interés medioambiental.
- Estudios atmosféricos y climatológicos.
- Contaminación acústica.
- Gestión medioambiental en industrias. Viabilidad económica.
- Energías renovables, ahorro energético y contaminación atmosférica.

Temática



Objetivos

El VII Congreso "La Investigación ante la sociedad del conocimiento. Sostenibilidad y medioambiente" se centra en investigaciones medioambientales sobre áreas temáticas muy diversas.

La idea es abordar este tema desde un punto de vista multidisciplinar, de forma que constituyan un punto de encuentro entre investigadores de diferentes áreas y distinta procedencia; siendo esta VII edición un congreso consolidado de ámbito nacional con aportaciones internacionales.

Como en ediciones anteriores, el objetivo del congreso es intercambiar experiencias, resultados de investigación y establecer relaciones para abordar posteriores proyectos; tanto entre investigadores de la propia Universidad, como entre éstos y técnicos de centros tecnológicos o de empresas interesadas en la temática planteada, lo que favorece la transferencia de la tecnología de la Universidad al entorno industrial.

Destinatarios

Universitarios, investigadores, representantes de Institutos Tecnológicos y miembros de Departamentos de Investigación de empresas del entorno industrial.

Inscripción

Se fijan las cuotas de inscripción que dan derecho a: Libro de actas del congreso con ISBN, cafés, comidas en el Restaurante de la Font Roja, autobús de subida y bajada desde Plaza Parterre de Alcoi al CEMACAM Font Roja y viceversa.

Fecha tope pago de inscripciones: 15 de octubre.

CUOTAS INSCRIPCIÓN	Hasta el 01/10/2011	Después del 01/10/2011
Participantes	75€	100€
Estudiantes	40€	50€

Para hacer efectiva la inscripción debe enviarse fotocopia del resguardo por Fax: 966528438, o por e-mail a las siguientes direcciones: ctt@epsa.upv.es.

Envío de comunicaciones hasta el 10 de septiembre

<http://www.jornadasinvestigacion.epsa.upv.es>

Concentrar luz infrarroja a través de líneas de transmisión impulsará nuevas herramientas

Un trabajo de colaboración entre tres grupos del centro de investigación CIC nanoGUNE (San Sebastián) han desarrollado un innovador método para concentrar luz infrarroja a través de líneas de transmisión con el extremo en forma de cono en dimensiones nanométricas. Este dispositivo podría impulsar el desarrollo de nuevas herramientas de detección química y biológica, como espectrómetros de infrarrojos o biosensores con lab-on-a-chip (laboratorio en un chip) integrados.

Fuente: CIC nanoGUNE

En los instrumentos de óptica convencionales, como consecuencia de los efectos de difracción la luz no puede ser concentrada en puntos menores que la mitad de su longitud de onda. Un enfoque importante para superar el límite de difracción está basado en las antenas ópticas, cuyo nombre hace alusión a su homólogo en radiofrecuencia.

Tienen la capacidad de concentrar la luz en puntos diminutos, varios órdenes de magnitud más pequeños de lo que las lentes convencionales pueden conseguir. Pequeños objetos como moléculas o nanopartículas semiconductoras dispuestas en estos puntos de las antenas llamados “puntos calientes” (*hot spots*) pueden interactuar eficientemente con la luz.

Así, las antenas ópticas mejoran la espectroscopia de una sola molécula o la sensibilidad de los detectores ópticos. Sin embargo, el punto caliente está unido a la estructura de la antena, lo cual limita la flexibilidad a la hora de diseñar circuitos nanoópticos.

Los experimentos llevados a cabo en nanoGUNE muestran que la luz infrarroja puede ser transportada y nanoconcentrada mediante líneas de

transmisión diminutas, que consisten en dos nanocables dispuestos a corta distancia entre sí. Mientras las lentes y los espejos manipulan la luz en forma de ondas que se propagan libremente en el espacio, las líneas de transmisión guían la luz infrarroja en forma de onda de superficie fuertemente agarrada (*Nature Photonics*, 03 Abril 11).

Los investigadores de CIC nanoGUNE adaptaron el concepto de las líneas de transmisión clásicas al rango de frecuencia infrarrojo. Las líneas de transmisión son cables especializados para transportar, por ejemplo, señales de radiofrecuencia. Una forma simple consiste en dos cables de metal dispuestos en paralelo a una distancia corta, también llamada línea paralela. Antiguamente era una estructura muy utilizada para conectar el receptor de radio o televisión a la antena del tejado. Aplicado a frecuencias MHz, donde las longitudes de onda habituales se encuentran en un rango de entre unos centímetros y varios metros, es uno de los principales ejemplos de transporte de energía en guías de onda con un diámetro de escala sublongitud de onda.

En los experimentos, los investigadores demostraron que la luz infrarroja puede ser transportada de la misma forma, reduciendo el tamaño de las líneas de transmisión a menos de un

micrómetro (ver imagen). Para ese fin, fabricaron dos nanocables conectados a una antena de ondas infrarrojas.

La antena captura la luz infrarroja y la convierte en una onda de superficie que se propaga a lo largo de las líneas de transmisión. Mediante la reducción gradual del grosor de la línea de transmisión (dándole forma cónica), los investigadores han demostrado que la onda de superficie infrarroja es comprimida a un punto diminuto en el vértice del cono de solo 60 nm de diámetro (la imagen de la estructura del dispositivo).

Este pequeño punto es 150 veces más pequeño que la longitud de onda libre en el espacio, lo que pone de manifiesto el extremo nivel de concentración en escala sublongitud de onda conseguido en el experimento. Los investigadores aplicaron su técnica de microscopía de campo cercano introducida recientemente (Schnell et al., *Nano Lett.* 10 3524 (2010)) para trazar los diferentes componentes del campo eléctrico de la concentración infrarroja con resolución de nanoescala.

La nanoconcentración de la luz infrarroja mediante líneas de transmisión tiene importantes implicaciones en la espectroscopia y en aplicaciones de detección. ■

Desarrollando la energía de las mareas

ALSTOM aborda una fuente renovable con futuro.

Fuente: ALSTOM

Se prevé que el año 2020, casi el 50% de las nuevas instalaciones que se implanten para producción de energía no emitan CO₂, y entre ellas se encuentran las de origen oceánico. Aunque pueden abordarse con varias tecnologías, las que utilizan la energía de las mareas o de las olas son las que se encuentran en un grado más avanzado de desarrollo.

La generación mareomotriz es la más regular, pues está basada en las corrientes producidas en los movimientos de ascenso y descenso de las mareas, utilizando la energía cinética de las corrientes marinas para mover turbinas y generadores, del mismo modo que el aire mueve los aerogeneradores. Dada la diferencia de densidad del agua respecto al aire (800 veces), una corriente de agua a 2,5 m/s, contiene la misma energía por metro cuadrado que el viento a 80 k/h.

Sin embargo también existe una limitación de emplazamientos para que se den las características naturales idóneas para una producción económica: profundidades entre 30 a 60 m, velocidad del agua mayor de 3 m/s, fondos lisos, proximidad a la costa con disposición de puerto, red eléctrica para acceso de la generada, etc. Entre ellos están las costas de Canadá, el Mar del Norte, el Reino Unido, norte de Francia y zonas del sudeste de Asia y Australasia. Se estima un máximo de capacidad mundial generadora de unos 100 TWh (0,5% del consumo global).

Aunque inicialmente los costos de generación puedan ser más altos que otras renovables más maduras, como la eólica, se espera que los avances tecnológicos y la economía de escala, suponga prontas reducciones. Dado además que la dimensión de cada unidad no será muy grande, se prestarán mejor a producciones seriadas.

Desde el punto de vista medioambiental, las unidades generadoras no producen impacto visual, las turbinas se protegen con una envolvente para evitar los daños a la fauna marina y su ruido en el agua es menor que el de las hélices de los buques.

Desde el año 2009, la multinacional francesa **ALSTOM** en acuerdo con la canadiense **Clean Current Power Systems, Inc.**, ha desarrollado los conceptos que Clean Current ya había

probado en una primera instalación piloto. Ahora ALSTOM prepara una instalación comercial a escala de 1 MW con un diámetro interior de turbina de 13 m, que validará el próximo diseño con diámetro interior de 20 m. La instalación piloto se montará el año 2012 en la Bahía de Fundy (Canadá) y el siguiente y mayor diseño en las costas de la Bretaña francesa el año 2013.

La energía de las corrientes ascendente y descendente se convierte en rotativa con una turbina de 5 álabes bi-direccionales de eje horizontal rodeada de un envolvente cilíndrico que minora turbulencias. El movimiento se aplica directamente a un alternador de ve-

locidad variable de imanes permanentes situado en el centro, enviándose la corriente producida por un cable submarino a la costa para que tras el adecuado tratamiento eléctrico pueda ser incorporada a la red.

El generador de imanes permanentes de 1 MW para esta instalación, se está construyendo en la planta de ALSTOM Hydro Power en **Trápaga** (Vizcaya). ■



Proceso del traslado para montaje de la turbina piloto



Vista infográfica de la turbina mareomotriz en construcción

UNIVERSIDAD DE SEVILLA

**15 AÑOS IMPARTIENDO FORMACIÓN
EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

Los títulos de **Master Propio en Mantenimiento Industrial y Técnicas de Diagnóstico** y **Master Propio en Ingeniería y Gestión del Mantenimiento** de la Universidad de Sevilla, se presentan como una de las ofertas de formación más completa en este sector industrial, como así lo confirma el hecho de que en su pasada edición lo cursaran más de 120 alumnos de forma presencial y a distancia. Al curso acceden alumnos que son responsables y operadores de mantenimiento, tanto en líneas de proceso de producción como de instalaciones subsidiarias y que forman parte de empresas de servicio o de producción. También tienen presencia los gestores de mantenimiento, personal de ingeniería de planta y no podemos olvidar aquellos alumnos en últimos cursos de carrera que quieren iniciar su labor profesional en este área.

Los Master dan **una respuesta dinámica y ágil a la demanda del sector industrial**, de profesionales con formación específica en mantenimiento, cubriendo la escasa o nula formación en esta disciplina de las enseñanzas de grado.



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

C/ Virgen de África nº7
41011 - SEVILLA
Tlf: 954 55 28 42
Tlf: 629 92 91 57
Fax: 954 28 27 77
E-mail: aordonez@us.es

Máster Propio en Mantenimiento Industrial y Técnicas de Diagnóstico

Máster Propio en Ingeniería y Gestión del Mantenimiento

Experto Universitario en Mantenimiento de Medios e Instalaciones Industriales

MÓDULO I: Gestión y técnicas de mantenimiento. **MÓDULO II:** Mantenimiento de instalaciones electromecánicas. **MÓDULO III:** Mantenimiento de instalaciones de acondicionamiento de aire, frío, ACS y contra incendios. **MÓDULO IV:** Mantenimiento de instalaciones de abastecimiento y distribución de aguas.

Experto Universitario en Mantenimiento Predictivo y Diagnosis de Fallos

MÓDULO V: Introducción al mantenimiento predictivo. **MÓDULO VI:** Análisis de vibraciones. **MÓDULO VII:** Termografía. **MÓDULO VIII:** Tribología. **MÓDULO IX:** Ensayos no destructivos. **MÓDULO X:** Ensayos de máquinas eléctricas. **MÓDULO XI:** Máquinas alternativas. **MÓDULO XII:** Parámetros de monitorización de una cadena cinemática. **MÓDULO XIII:** Causas de fallos e identificación de los mismos. **MÓDULO XIV:** Correcciones "in situ". **MÓDULO XV:** Integración de tecnologías predictivas.

Experto Universitario en Gestión del Mantenimiento

PARTE 1: Gestión y organización del mantenimiento. **PARTE 2:** Matemáticas de la fiabilidad. **PARTE 3:** Ingeniería de fiabilidad. **PARTE 4:** Mantenimiento centrado en fiabilidad (RCM). **PARTE 5:** Mantenimiento productivo total (TPM). **PARTE 6:** Ingeniería del riesgo. **PARTE 7:** Fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad integral (RAMS). **PARTE 8:** Terotecología, economía y mantenimiento.

PREINSCRIPCIÓN: Septiembre-Octubre de 2011.

MATRÍCULA: Noviembre/Diciembre de 2011.

DESARROLLO DEL CURSO: Diciembre de 2011 a Junio de 2012.

DIRECTOR DE LOS ESTUDIOS: Antonio Ordóñez Guerrero.

(Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales).

www.master.us.es/mmindustrial

Los ojos de las polillas inspiran un nuevo nanorecubrimiento

Fuente: OPTI



Científicos del *Instituto Fraunhofer* para la Mecánica de los Materiales (IWM) en Friburgo, han creado un recubrimiento que puede ser utilizado para gafas y pantallas no reflectantes.

Los científicos se inspiraron en una propiedad inusual encontrada en los ojos de las polillas, cuya superficie está recubierta de una película nanoestructurada natural que elimina los reflejos, lo que les permite ver bien en la oscuridad, sin reflejos que muestren su posición a los depredadores.

Mientras que los métodos convencionales aplican recubrimientos antirreflectantes en un proceso posterior a la producción de la pieza, los científicos del *Fraunhofer* han desarrollado una manera de reducir los reflejos de la luz durante la fabricación de la pieza o componente.

Para ello, han desarrollado un

recubrimiento que reproduce una estructura superficial ópticamente eficaz. Este recubrimiento es aplicado en el molde, de manera que cuando un polímero es inyectado en el mismo, las nanoestructuras se transfieren directamente al componente. Como no se requiere un segundo proceso, se consigue un gran ahorro en costes y se aumenta la eficiencia.

Además, mientras que algunas coberturas antirreflectantes como el plexiglás pueden ser rayadas fácilmente, la nueva nanocobertura se puede utilizar para superficies resistentes a la limpieza y a las rayadas. ■

Material de alta eficacia para convertir calor en electricidad

Fuente: Ainnova



Un equipo de especialistas ha puesto nanocristales de sal gema en telururo de plomo, creando un material que puede obtener

electricidad de fuentes de calor como por ejemplo los tubos de escape de vehículos y la maquinaria industrial. Todo ello con mayor eficacia que lo conseguido por otros materiales anteriormente.

El material exhibe un excelente perfil termoeléctrico que se espera permita convertir en electricidad el 14% del calor residual, algo nunca antes logrado. Químicos, físicos y científicos de los materiales de la Universidad del noroeste, en EEUU, han trabajado juntos para desarrollar el material.

Desde hace un centenar de años, se sabe que los semiconductores tienen esta propiedad que permite generar electricidad. Para hacer eficaz este proceso, todo lo que se necesita es el material correcto, y el equipo del químico

Mercouri Kanatzidis ha encontrado una buena receta para producir un material de alta eficiencia.

El nuevo material podría incluso permitir, en forma de un pequeño dispositivo adosado a una lámpara eléctrica, hacer a ésta más eficiente al tomar el calor que genera y convertir parte de éste, del 10 al 15%, en electricidad, una forma de energía a menudo más útil.

Cualquier industria que use el calor para fabricar sus productos podría obtener un ahorro energético al reutilizar el calor mediante un dispositivo derivado de la innovación tecnológica conseguida por este grupo. ■

Jardines verticales para reducir el consumo energético en edificios

Tres profesores de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica de la Universidad de Sevilla han desarrollado y patentado un nuevo sistema para el acondicionamiento bioclimático de edificios a través de jardines verticales y techos verdes. El sistema tiene como objetivo reducir el consumo energético producido por las instalaciones de climatización y ventilación de los edificios, y retiene además partículas exteriores que pueden producir alergias y gases contaminantes nocivos para la salud.

Fuente: Andalucía Innova



Proyecto Greening de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros.
Imagen: Sciencepics

Este concepto trata de integrar la naturaleza dentro de la ciudad a través de la implantación de espacios vegetales en techos o fachadas.

La principal aportación de esta investigación a la jardinería vertical son los sistemas activos, que consisten en hacer pasar una corriente de aire a través de los jardines que actúa como mecanismo de climatización para reducir la temperatura de los edificios. Su funcionamiento se basa, por tanto, en hacer pasar el aire caliente del exterior o interior del edificio a través del jardín vertical. Este sistema activo permite que, al mismo tiempo, circule agua por el sustrato donde se desarrolla la vegetación, que absorbe el calor del aire al evaporarse. Este proceso es conocido como refrigeración evaporativa. De esta forma los niveles de humedad, temperatura y calidad del ambiente interior del edificio se mantienen óptimos y equilibrados. Este sistema es rentable, por tanto, en lugares donde la temperatura es muy alta.

Además de actuar como climatizadores, estos sistemas activos tienen la capacidad de biofiltrar el aire. Es decir, retienen partículas exteriores como el polen, que pueden producir alergias, o gases contaminantes y nocivos para la salud como el óxido de nitrógeno o el dióxido de carbono. Emitidos, por ejemplo, por los motores de los coches. ■

RODMAN

FABRICACIÓN DE MATERIAL ELÉCTRICO

AVISADORES ACÚSTICOS INDUSTRIALES

ELECTRONICOS		ELECTROMAGNÉTICOS		
SE-206	SEE-207 I	ZPI / ZEPI	Z-1 C I	ZE-1 C I
APLICACIONES: TIMBRE DE PUERTA, PARA FABRICAS, ESCUELAS, ETC...				
SE-600	SE-707 I	T-10/T-15 / T-23		S -87-CI
APLICACIONES: GRÚAS, EMERGENCIAS, AVISOS DE INCENDIOS, TOROS, MONTACARGAS, ASCENSORES, ETC				
TIMBRES POTENTES TIMBRES DE CAMPANA Y MOTORIZADOS				

AVISADORES ACÚSTICOS DOMÉSTICOS

DD-2	DD1	ZD-1	DD-3
APLICACIONES: DING-DONG GRAVE PARA ENTRADAS EN VIVIENDAS, DESPACHOS Y TIENDAS		DING-DONG AGUDO PARA VIVIENDAS	APLICACIONES: ZUMBADOR ACCESO TIENDAS, VIVIENDAS
APLICACIONES: SIN CABLES PORTÁTIL			

AVISADORES LUMINOSOS

XENON	INCANDESCENCIA	LEDS
AL-1	AL-2	AL-3
APLICACIONES: AEROPUERTOS, ANTENAS, GRÚAS, ETC...		AL-L
APLICACIONES: OBRA, VIAS PÚBLICAS, AEROPUERTOS, BALIZAS...		

RELÉS Y DETECTORES DE MOVIMIENTO

CDS-24	DM-10	DMT	DMP	CM5	RF-10
APLICACIONES: LUCES DE PASILLOS, ESCALERAS, ALUMBRADO PÚBLICO, ASEOS, ALMACENES, PARKINGS, ESCAPARATES, TIENDAS, ETC...					

AVISADORES ESPECIALES

SLA	Z-2TL
NUEVOS PRODUCTOS	
AVISADOR ACÚSTICO LUMINOSO AUTÓNOMO	ZUMBADOR C.A. INTERMINENTE LUMINOSO TELEFÓNICO

DISTRIBUIDO EN ALMACENES DE MATERIAL ELÉCTRICO



SOLICITE CATÁLOGO GENERAL



RODMAN
FABRICACIÓN DE MATERIAL ELÉCTRICO
www.rodman-elect.com

Un escúter Suzuki con pila de combustible obtiene el certificado WVTA en Europa

Fuente: Nikkei Automotive Technology



Módulo de la pila de combustible: el aire llega a través del filtro de aire en la parte superior y sale por el fondo.

El escúter con pila de combustible **Burgman** de **Suzuki Motor Corp.**, que está siendo ensayado en el Reino Unido, será el primer vehículo del mundo a pila de combustible que obtenga el certificado de Whole Vehicle Type Approval (**WVTA**).

Para vender un vehículo en Europa, es necesario recibir certificados de cada nación miembro de la Unión Europea.

Pero obteniendo el WVTA, es posible vender el vehículo en todos los estados miembros.

En colaboración con la empresa británica **Intelligent Energy, Ltd.**, Suzuki ha participado, desde febrero de 2010, en los ensayos de campo para vehículos a pila de combustible organizados por el **Technology Strategy Board (TSB)**, organización gubernamental que promueve el desarrollo tecnológico en el Reino Unido.

TSB impulsa el desarrollo tecnológico a través de innovaciones, nuevos productos, nuevos servicios, etc., facilitando ayuda financiera para el desarrollo industrial. El terreno de ensayos se encuentra en un área junto a la **Universidad de Loughborough**, situada en el centro del Reino Unido. Suzuki ha ensayado allí tres unidades del escúter **Burgman**.

Suzuki ha obtenido para todos ellos la aprobación de vehículo monopla-

(SVA). De ese modo, el escúter **Burgman** se convierte en el primer vehículo a pila de combustible que ha conseguido el WVTA (ningún vehículo de cuatro ruedas lo ha logrado hasta ahora)

El escúter **Burgman** a pila de combustible está basado en el **Burgman 125**, diseñado para moverse en áreas urbanas. No tiene motor de explosión, transmisión con cambios, depósito de gasolina, etc., sino un depósito de hidrógeno, la pila de combustible, la batería recargable, etc. Su peso es de 170 k, lo que supone solo 10 k más que el modelo movido con gasolina.

Las dimensiones son 2.055 (L) x 725 (A) x 1.240 (H). Está equipado con una batería recargable de ión-litio de 0,5 kW. Su recorrido máximo es de 350 km a una velocidad de 30 km/h y su velocidad máxima es de 63 km/h. ■

El centro de captura de CO₂ logra su "Primer Fuego"

El Centro de Desarrollo de Tecnologías de Captura de CO₂ situado en León ya está en marcha. Los técnicos lograron encender los cuatro quemadores de la caldera de Carbón Pulverizado (CP), de forma simultánea y estable, dando por cumplido el hito de la puesta en marcha del primer centro de captura de CO₂ en España.

Fuente: SINC



// Este primer encendido se logró con gas natural como paso previo al encendido con carbón

pulverizado", señala **Pedro Otero**, director técnico del proyecto. Pero para llegar hasta aquí se ha superado una serie de requisitos como disponer de sistemas como el de protección contra incendios, de energía eléctrica, sistemas de refrigeración y aire comprimido y la parte correspondiente del sistema de control distribuido (SCD) y el circuito de gases implicado.

La instalación de CIUDEN, principal instrumento del Gobierno para desarrollar las tecnologías de captura, transporte y almacenamiento de CO₂, es única en España, y una de

las más importantes del mundo para estabilizar la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

El nuevo centro de captura, situado en **Cubillos del Sil (El Bierzo)**, y que ha contado con una inversión de 128,4 millones de euros, es "singular" porque permite investigar con todo tipo de carbones e incorpora dos tecnologías distintas de oxidación, carbón pulverizado (CP) y lecho fluido circulante (LFC) —esta última es única en el mundo—. ■



HiDry⁷², la mejor inversión a largo plazo para instalaciones eléctricas



La nueva gama de transformadores secos encapsulados al vacío de ABB, hasta 63 MVA y 72,5 kV de nivel de aislamiento, suponen la elección óptima para garantizar la rentabilidad a largo plazo en instalaciones eléctricas que precisan de altas potencias y tensiones, ya sean en plantas de generación e industriales, edificios o subestaciones eléctricas urbanas. Su diseño compacto, seguro y de reducido impacto ambiental, unido a su largo ciclo de vida, reduce al mínimo los costes asociados a la instalación, los equipos adicionales de seguridad necesarios, y los gastos de mantenimiento durante su vida útil, convirtiéndolo en la inversión más rentable a largo plazo disponible hoy día en el mercado.

www.abb.es

ABB en Zaragoza fabrica y ensaya satisfactoriamente el primer transformador seco encapsulado al vacío HiDry⁷² (10 MVA a 66 kV) con regulación en carga de tipo seco

Fuente: ABB



En el año 2003 un importante cliente contactó con la planta de ABB en Zaragoza, para desarrollar niveles de aislamiento superiores para transformadores secos. Tradicionalmente, el nivel de aislamiento máximo para transformadores en tecnología “seca” era de 36 kV. Dicha demanda obligó a desarrollar un transformador seco de 45 kV de tensión nominal y 52 kV de clase de aislamiento. Este desafío fue aceptado y el equipo de investigación y desarrollo de la fábrica comenzó el proyecto. Un año más tarde, la fábrica había construido satisfactoriamente la primera unidad, un transformador de 5 MVA y 45/15 kV. Este gran paso en transformadores secos fue conseguido utilizando la tecnología de encapsulado al vacío en resina epoxi.

Como siguiente paso, bajo la coordinación de I+D+i del grupo ABB, y conducido por el equipo de desarrollo en Zaragoza, se estableció un nuevo desafío: **el nivel de aislamiento de 72.5 kV**. Así, en febrero de 2011, se

contó con la presencia de una de las mayores utilities de España para presenciar todos los ensayos de laboratorio llevados a cabo satisfactoriamente sobre el primer transformador seco HiDry⁷² provisto de regulación en carga (OLTC) también seco. El prototipo fue fabricado en 2010 de acuerdo a la Norma de dicha Utility, en un proceso de colaboración, cumpliendo con una de las especificaciones técnicas más exigentes que existen para transformadores de potencia con un nivel de aislamiento de 72,5 kV: **transformadores HiDry⁷²**. El transformador fue inicialmente diseñado para trabajar bajo regulación en vacío dado que en esos momentos no existía en el mercado una solución técnica de regulador en carga seco para 72.5 kV. Finalmente, se adaptó para interconectarlo con el regulador en carga de tipo seco, y ensayarlo conjuntamente. ABB en Zaragoza es la única fábrica de transformadores certificada con la ISO 17025:2000 (requerimientos generales para la ejecución de los ensayos de transformadores eléctricos de potencia). Se llevaron a cabo satisfactoriamente todos los ensayos de rutina y tipo (impulso de 325 kV y tensión aplicada de 140 kV durante un minuto). Esta ha sido la primera vez que una empresa fabrica y ensaya un transformador de estos niveles de potencia con regulación en carga de tipo seco para este nivel de aislamiento: 72.5 kV.

Desde un punto de vista tecnológico, los puntos remarcables que hacen la tecnología de encapsulado al vacío apropiada para altos niveles de tensión son:

1. El bobinado de alta tensión mediante **tecnología de discos**, que permite una distribución perfecta de la tensión a lo largo de todo el arrollamiento, evitando diferencias de potencial significativas entre puntos cercanos. De hecho, esta es

la misma tecnología que la utilizada en los transformadores de aceite para niveles de tensión similares.

2. La alta capacitancia de las bobinas de alta tensión permite una **distribución uniforme** de la onda de la tensión de impulso a lo largo de las espiras.
3. Durante la fase de diseño, el análisis de ingeniería de detalle (diseño modelado utilizando el **método de diferencias finitas**) permite conocer precisamente los mayores puntos de tensión durante el ensayo de impulso, así como la distribución de tensiones dentro del arrollamiento. Por tanto, dado que las variaciones de tensión entre puntos son conocidas, se definen los correctos materiales de aislamiento y su dimensionamiento con márgenes de seguridad.
4. El diseño del transformador de 72,5 kV es más exigente que cualquier otro, y requiere **soluciones de fabricación especiales**, así como terminales de alta tensión con ejecución especial, aislamientos reforzados, cubiertas redondeadas, mayores distancias de aislamiento o soportes especiales para incrementar las líneas de fuga.

Las principales razones para elegir transformadores secos en altas tensiones:

1. **Seguridad**: elimina los riesgos de fuego, explosión y humo.
2. **Económicas**: ahorros en instalación, seguridad y dispositivos de protección.
3. **Ambientales**: ahorros de energía, políticas específicas de compañías eléctricas.
4. **Legales y beneficios gubernamentales** relacionados con el medio ambiente, así como subvenciones, reducción de impuestos o pólizas de seguros.
5. **Tecnológicas**: líderes en tecnología, “innovadores”. ■

Generación de energía: ISCC Ciclo Combinado Híbrido de Kuraymat

Visión crítica de la tecnología híbrida

Autor: Juan Ignacio de la Fuente Rodríguez
Director de Proyecto
IBERDROLA Ingeniería y Construcción, S.A.

Los proyectos tipo ISCC (*Integrated Solar Combined Cycle*) incorporan una parte de energía solar a un ciclo combinado (existente o en construcción) para ahorrar el coste equivalente en combustible convencional y mejorar su rendimiento exergético.

A medida que los combustibles fósiles son menos competitivos por su coste y emisiones en CO₂, la incorporación de energía solar es una alternativa a tener en consideración porque aprovecha los activos de plantas ya existentes o nueva construcción para mejorar la eficiencia exergética, al mismo tiempo que modula la inversión en equipamiento solar en función del presupuesto y necesidades de generación, los ciclos híbridos confirman que ambas tecnologías no se excluyen sino que se complementan hacia un proceso más eficiente.

El ciclo ISCC de *Kuraymat* desarrollado por *Iberdrola Ingeniería y Construcción* en Egipto es una planta híbrida, flexible en cuanto a operación y con alta eficiencia exergética¹ diseñada para trabajar en dos modos de funcionamiento: “noche” como un ciclo combinado convencional de gas natural y “día” como un ciclo convencional al que se le añade la aportación exergética “gratuita” procedente sol.

En EEUU se han promulgado políticas tipo RPS (*Renewable Portfolio Standards*), que incluyen mandatos específicos en los que se requiere un porcentaje de energías renovables, como la solar, en proyectos tradicionales de generación, siendo los ciclos ISCC una respuesta eficaz a esta directriz.

El coste marginal por MWe instalado en tecnología híbrida es el 65% superior a un Ciclo Combinado (CC) convencional, debido principalmente al sobredimensionamiento de equipos principales como la Turbina de Vapor, transformadores principales, intercambiadores solares HTF (*Heat Transfer Fluid*), generador de vapor HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*), y el propio equipamiento solar (Colectores, bombas de impulsión, fluido térmico HTF, etc.), así como la mayor exigencia en materiales por el aumento de transitorios, fatiga y stress térmico consecuencia de las variaciones de carga noche/día y estacionales.

Este sobrecoste se compensa con las altas eficiencias exergéticas alcanzadas, hasta 12 puntos por encima



de un CC convencional, es decir, un rendimiento bruto de 50,5 % para un CC convencional llega en el caso de ISCC *Kuraymat* hasta el 62,4 % en condiciones nominales de radiación solar (50 MJ/s).

Los costes asociados de un ciclo híbrido son todavía competitivos, seguidos a distancia por los costes de una planta con tecnología

¹ La exergía es un parámetro que mide la calidad de la energía. Este parámetro puede emplearse para analizar la eficiencia energética de los procesos industriales. Con un análisis de exergía pueden compararse diferentes alternativas para comprobar cuál tiene el mayor utilidad potencial como fuente de trabajo útil.

Colaboración

Bases de Diseño

DNI/Direct Normal Insolation	2.431 kW h/m ² /año
Día de referencia solar (día referencia)	700 W/m ²
Superficie del campo solar	130.800 m ²
Número de colectores CSP	160
Número de lazos	40
Potencia solar (día referencia.)	50 MJ/seg
Temperatura lazo caliente entrada HTF Hx	393 °C
Temperatura lazo frío salida HTF Hx	293 °C
RPO ² Generador Turbina de Gas	74,4 MWe
RPO Generador Turbina de Vapor	59,5 MWe
Potencia nominal Turbina de Gas	74 MWe
Potencia nominal Turbina de Vapor	80 MWe
Energía solar procedente del campo solar (3)	130,8 GWh/año
Capacidad Neta Total "modo día" (1)	122,9 MWe
Capacidad Neta Total "modo noche"	103,7 MWe
Pérdida Solar	2,7 MWe
Contribución Exergética Solar (2)	19,2 MWe
Solar Exergetic Share (4)/(5)	3,9%
Generación Exergetica Convencional anual (5)	836,5 GWhe/año
Generación Exergetica Solar anual (4)	34 GWhe/año
Rendimiento Transformación Solar (4)/(3):	26,0%
Contribución Solar vs. Total Generado (2)/(1)	15,6%
Gross Plant Efficiency (día referencia)	62,63% (a 20°C)

exclusivamente solar (seis veces superiores).

Según el EPRI (*Electrical Power Research Institute*), el uso de la energía solar para mejorar el rendimiento de CC convencional es la opción más competitiva por las sinergias existentes en equipamiento y el aprovechamiento intensivo de la inversión inicial de forma sostenible, atractiva para los inversores y su alta eficiencia exergética.

Descripción del ciclo ISCC Kuraymat

El emplazamiento del Proyecto está situado en la localidad de *Kuraymat* a 29°16'45" Norte y 31°15'9" Este, a 95 km al sur de El Cairo y 2,5 km al Este del río Nilo, en pleno desierto y en una zona prácticamente despoblada, con una irradiación solar superior a 2.400 kW h/m²/año.

El Proyecto se presentó por primera vez al GEF (*Global Environmental Facility*) del Banco Mundial en 1.999, que decidió patrocinar cuatro (4)

proyectos en: Egipto, Marruecos, India y México mediante una subvención a fondo perdido de 49 millones USD para cada proyecto.

La financiación restante en moneda extranjera está asegurada por el JICA (*Japan International Cooperation Agency*) y el cliente final NREA (*New Renewable Energy Authority*) financia en moneda local otra parte

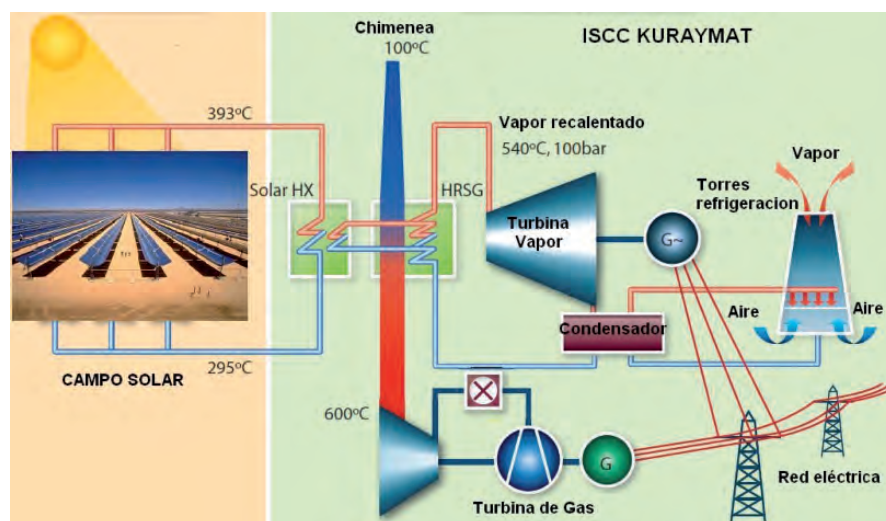


de la inversión en equipamiento local a través del NBE (*National Bank of Egypt*).

La petición de oferta del ciclo ISCC *Kuraymat* de Egipto se publicó en 2004 en dos lotes diferentes, una para la Isla Solar y otra para la Isla de Potencia junto a la integración con la Isla Solar, ambas fueron adjudicadas en Octubre 2007.

La planta empezó a construirse en Enero 2008 y finalizó la Construcción y Puesta en Marcha en Diciembre 2010. Acto seguido dio comienzo una etapa de Integración con el Campo Solar, Pruebas de Rendimiento y Fiabilidad que concluirán en el 2011.

La aportación solar, en términos exergéticos netos 19,2 MWe, reduce las emisiones de CO₂ un 15,6% para condiciones nominales de insolación y un 3,9 % (*Solar Exergetic Share*) como promedio anual.



² Rated Power Output

La fuente de calor principal proviene de los gases de escape de una Turbina de Gas (TG) de GE tipo MS 6111FA que consume 4,7 Kg/s de Gas Natural y 200 Kg/s de aire exterior, sincronizada a un generador eléctrico capaz de producir 74 MWe a 20°C de temperatura ambiente.

Los gases calientes de escape de la TG con un caudal de 206 Kg/s y una temperatura de 550 °C pasan a la zona de alta presión del generador de vapor y a medida que se enfrían a la zona de baja presión y precalentamiento del agua.

En la zona de baja presión hay dos economizadores, un evaporador, un tanque de vapor y un recalentador de baja presión, y en la zona de alta presión tres economizadores, un evaporador, un tanque de vapor a una presión de 80 bar y dos recalentadores de vapor a alta presión.

La Turbina de Vapor (TV) construida por SIEMENS de la serie SST 900, de salida axial horizontal al Condensador, recibe vapor en baja y alta presión procedente de los recalentadores del HRSG respectivamente. La TV está sincronizada a un generador eléctrico de 80 MWe por el lado opuesto.

Los gases de combustión una vez enfriados salen por la chimenea a una temperatura próxima a 100°C.

El vapor muerto de la TV pasa por al Condensador donde cambia de fase vapor a agua saturada, ligeramente sub-enfriado, para ser bombeado al desaireador y de nuevo a los generadores de vapor, para repetirse el ciclo impulsado por bombas y otros equipos auxiliares.

El foco frío del ciclo está formado por un circuito cerrado de Torres de Refrigeración de tiro forzado con agua de aporte procedente del río Nilo tratada en una Planta de Tratamiento de Agua capaz de producir agua de proceso y desmineralizada, para el propio ciclo y limpieza de espejos del Campo Solar.

Intercambiadores Solares HTF

En los intercambiadores solares HTF es donde se realiza el intercambio de energía solar y el calentamiento/vaporización del agua del ciclo. Están

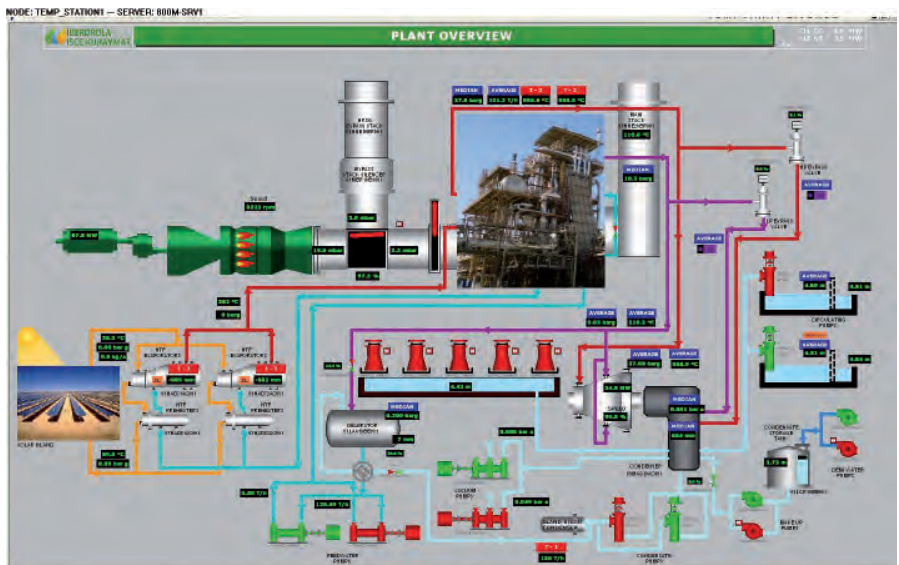


fabricados por la holandesa NEM y son críticos por las exigentes condiciones de trabajo, fatiga y stress térmico de los materiales debido al elevado número de transitorios y variaciones de carga como consecuencia de la energía procedente del sol y estacionales.

Constan de dos trenes (no redundantes) y cada tren por dos etapas, en una primera etapa el agua se precalienta y en una segunda se transforma en vapor saturado (*Kettle boiler*). Estos intercambiadores tienen especial complejidad por las distintas fases de los fluidos, las variaciones de temperatura (modo día y noche), fluidos de proceso (aceite, agua y vapor) y las importantes demandas de agua/vapor requeridas.

El proceso de arranque es crítico:

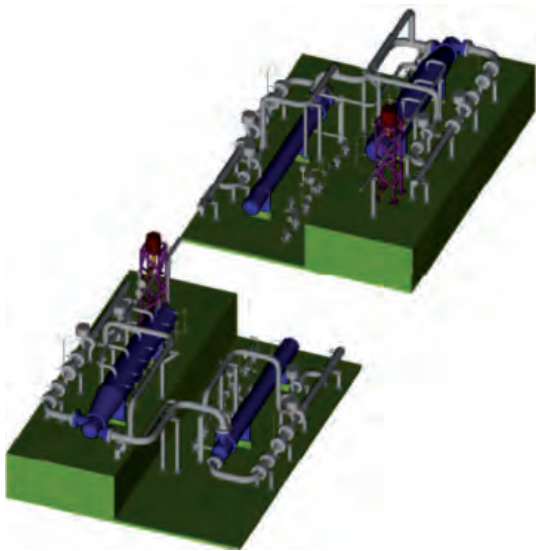
1. TG y HRSG operando al 100% de carga con el bypass del precalentador y el Evaporador abiertos.
2. El vapor circula al evaporador y presuriza el precalentador y el evaporador.
3. La temperatura de entrada (lado aceite) aumenta conforme la carga solar. El caudal de los HTF aumenta gradualmente.
4. Tan pronto como la temperatura del lado caliente del HTF es igual o más alta que la temperatura inicial del agua del evaporador, el bypass se cierra y el HTF circulará fluido a través de la carcasa del evaporador. Cuando la temperatura



Colaboración

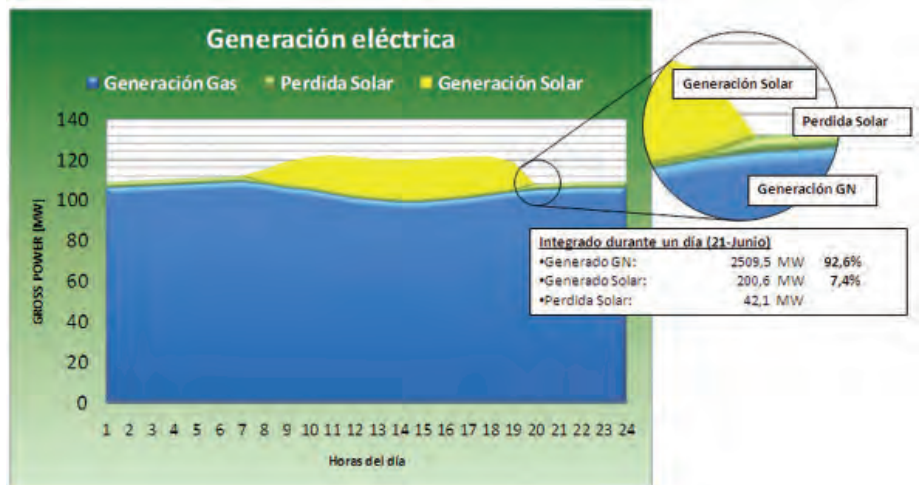
del agua alcance 200°C, el bypass abre y se posiciona a un mínimo de 65% para limitar la entrada de calor y el hinchamiento.

5. El evaporador comienza a hervir y el nivel de agua aumenta por el hinchamiento. Tras el hinchamiento se genera el primer vapor. Cuando la producción de vapor ha aumentado a 2 Kg/s, el bypass mínimo abriendo es reconfigurado a 0%. El agua de alimentación empezará a fluir como resultado del nivel del controlador de nivel.
6. Cuando la temperatura del lado caliente supera los 293°C, el controlador del bypass del evaporador se posiciona a operación normal y se sitúa el controlador del lado frío del HTF a 293°C.
7. El intercambiador HTF está ahora en operación, con un factor de aproximación de 3°C y 293°C en la temperatura del lado frío.



La Turbina de Vapor y el efecto de la Pérdida Solar

La TV está sobredimensionada para trabajar a distintas cargas de caudal de vapor, modo “**día**” con el caudal de vapor procedente de la energía de los gases de escape de la TG y la energía aportada por el Campo Solar y modo “**noche**” como si tratase de un CC convencional. En consecuencia las



variaciones máximas de carga de la planta ISCC *Kuraymat* oscilan entre 103,7 MWe (modo noche) y 122,9 MWe (modo día), con una contribución exérgica solar neta de 19,2 MWe.

Esta variación de carga es absorbida por la TV como respuesta a los diferentes caudales de vapor producidos en los distintos modos de funcionamiento y transitorios térmicos, es decir, a máxima carga de la TG y una aportación solar nominal de 50MJ/s y 20°C de temperatura ambiente, la TV genera 59,5 MWe; sin embargo, como la aportación solar es variable a lo largo del día y para cada periodo estacional, la TV trabaja con caudales de vapor inferiores a los de diseño lo que conlleva pérdidas de eficiencia y efectos negativos también llamados “**pérdida solar**”.

Uno de los mayores retos de diseño de plantas híbridas para *Iberdrola Ingeniería y Construcción* es optimizar los efectos positivos de la energía procedente del sol y minimizar las ineficiencias producidas por el necesario sobredimensionamiento de equipos principales, principalmente la Turbina de Vapor y transformadores, para absorber las variaciones de carga modo día / noche asociado a este tipo de instalaciones industriales.

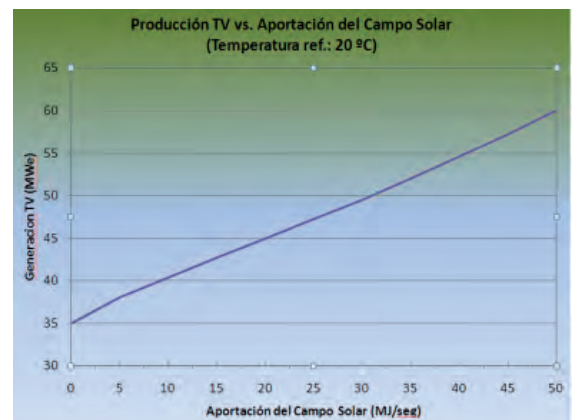
La relación existente entre energía solar y temperatura ambiente tiene gran importancia en

proyectos con tecnología híbrida, cuando aumenta la temperatura ambiente se produce una disminución del rendimiento de la TG, y en la energía aportada al generador de vapor HRSG que disminuye el caudal de vapor producido para la TV. En este caso la pérdida de eficiencia se compensa con el incremento de la aportación de energía solar, por lo tanto eventos con alta temperatura ambiente y alta radiación se equilibran mutuamente.

La figura siguiente muestra que la hibridación es un proceso altamente eficiente a medida que aumenta la aportación energética de origen solar:

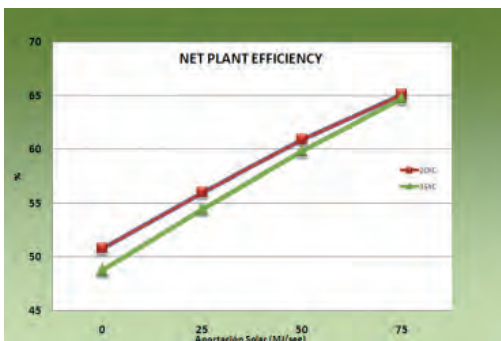
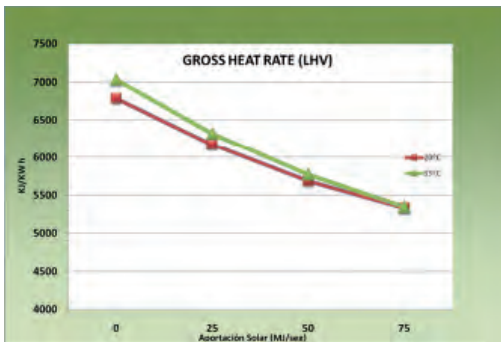
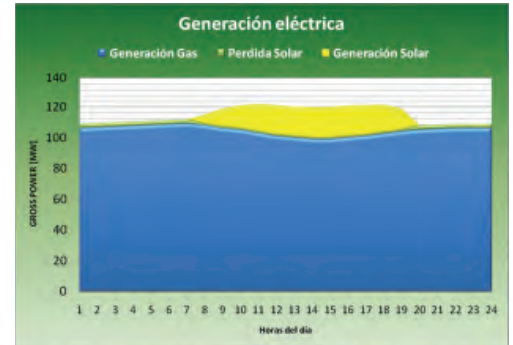
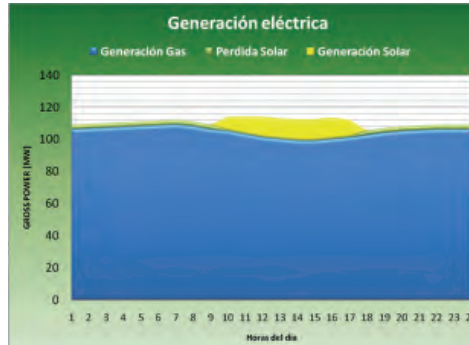
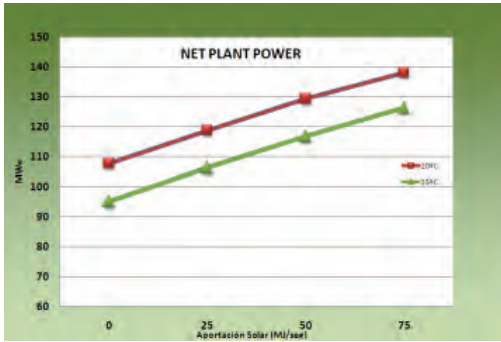
El resultado final en términos de generación eléctrica para dos épocas del año extremas y a lo largo de un día tipo, es la siguiente:

Como el sistema ha sido diseñado para que la TG funcione a plena carga y limitar así las variaciones de carga, en este equipo crítico en función de la irradiación solar, puede ocurrir que



21 Diciembre

21 Junio



parabólicos con una superficie total de 1.900 m² de espejos situados en una superficie de 60 hectáreas.

Hay 160 colectores tipo SKAL-ET distribuidos en 40 lazos equipados con un sistema de seguimiento acimutal capaces de captar la radiación solar en su movimiento este-oeste, asegurando el suministro de energía solar a los intercambiadores HTF en función de la Radiación Solar Directa.

La radiación solar se concentra en el foco longitudinal de cada elemento parabólico conectado en serie por el que circula un aceite TERMINOL VP1© que se calienta hasta una temperatura máxima de 393 °C a 20 bar para retornar a 293 °C y 12 bar de presión.

Los espejos han sido suministrados por FLABEG en 5 mm de espesor y los tubos concentradores por SCHOTT PTR 70.

El fluido HTF es bombeado por 3 x 50% bombas HTF cuyo caudal es regulado por válvulas de forma independiente entre la zona Este y Oeste del campo solar.

El sistema HTF solar incluye un vaso de expansión, filtros y un sistema anti congelación con caldera de gas natural para proteger las bombas de una potencial congelación.

Las condiciones de insolación de *Kuraymat* son excepcionales si consideramos que una radiación solar por encima del día de referencia 700 W/m² se alcanza durante más de 1.770 h/año, lo que significa un funcionamiento continuo durante más del 20% de año, lo que permite alcanzar un Solar Exergetic Share del 3,9% anual, muy alto para este tipo de instalaciones.

cuando la irradiación es muy alta y la temperatura ambiente baja (TG en máxima eficiencia), para no estrangular el gas de la TG, sea necesario rechazar carga térmica solar abriendo los bypass y de los intercambiadores HTF: lo que obligaría a desenfocar los espejos para mantener bajo control el estrés térmico en los intercambiadores solares HTF y constante la temperatura (lado caliente) de 393°C.

En la figura adjunta vemos los elevados rendimientos energéticos netos de la planta ISCC *Kuraymat* en función de la carga térmica de origen solar y la temperatura ambiente.

El Campo Solar

Está constituido por filas de colectores solares cilíndrico



Colaboración

Descripción	Unid.	CC	Solar	TOTAL
Coefficiente de disponibilidad	%	92,00%	96,00%	
CAPEX	MM€	150,5	76,8	227,3
O&M	MM€/año	6,8	2,4	9,2
Generación neta del ISCC	GWhe/año	836,5	34,0	870,5
Coste combustible	€/MWhe			21,12 ⁽¹⁾
Coste CAPEX	€/MWhe			10,44
Coste O&M	€/MWhe			10,57
LCOE	€/MWhe			42,27
Solar Share (exergetica)	%			3,91%

(1) Fuente: Natural Gas Prices, NGI's Daily Gas Price Index (4,4 USD/MMBTU)

Coste de la energía producida (LCOE)

Uno de los factores más importante en el éxito de este tipo de proyectos son las políticas de operación y mantenimiento (O&M) a medio y largo plazo por su impacto en los costes de electricidad durante el periodo de vida de la instalación.

El coeficiente LCOE (Levelised Cost Of Energy) viene dado por la ecuación:

$$\text{LCOE} = \frac{\text{Total Life Cycle Cost}}{\text{Total Lifetime Energy Production}}$$

En el caso de la Planta de ISCC *Kuraymat*, para un periodo de vida útil de la planta de 25 años, distribuyendo los costes de inversión inicial CAPEX uniformemente y simplificando los costes de O&M estables a lo largo de la vida de planta; los costes de generación de energía eléctrica son variables en función de la contribución de la energía solar.

Los calculos LCOE para el caso de Egipto estan distorsionados porque los precios de la electricidad y el Gas Natural están subvencionados por el propio Gobierno, por lo que un estudio más objetivo sobre la tecnología de hibridación debe hacerse con datos obtenidos de un mercado liberalizado (mas realistas (NYMEX natural gas prices index ~4,4 USD/MMBTU)) para sacar conclusiones propias sobre su viabilidad en el futuro.

Si la producción obtenida por generación de origen solar para esta instalación son 34 GWhe/año, el

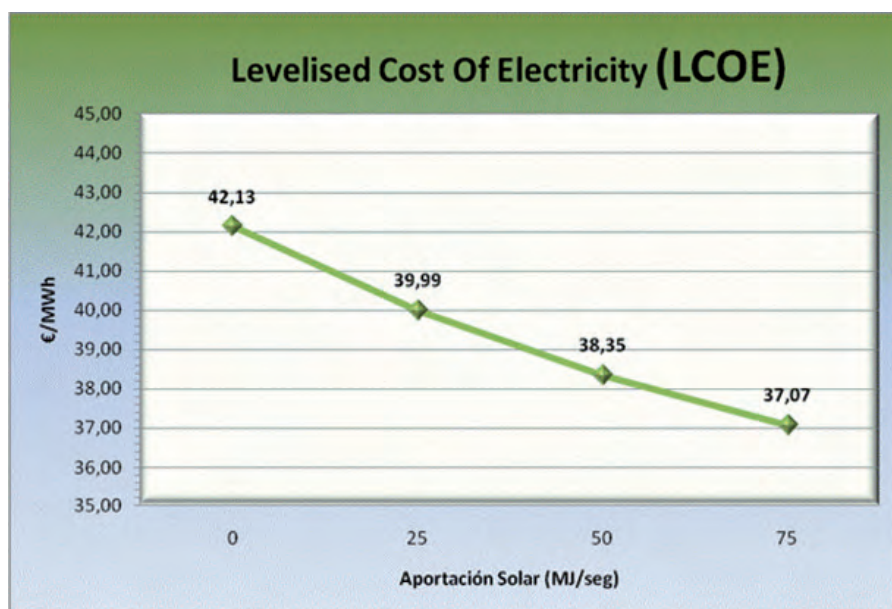
ahorro obtenido es del orden de 2,3 millones€/año, similar a los costes de O&M asociados (2,4 millones€/año de la parte solar) y los elevados costes de amortización de la inversión (76,8 millones€ de la inversión solar) a amortizar durante el periodo de vida de la central.

Por otra parte, el futuro mercado de CO₂ puede inclinar la balanza a favor de las tecnologías híbridas, al considerar como parte de la cadena productiva lo que antes era solo un residuo, es decir, el coste asociado a las emisiones de CO₂ que por la contribución solar dejaría de producirse, en ISCC *Kuraymat* se estima un ahorro en emisiones de 16.000 t CO₂/año, pero en la actualidad el mercado de CO₂ cotiza a la baja (fuente: SENDECO₂

a 17/Mar/2011; media a 30 días 14,82 €/t CO₂) lo que representa un ahorro del orden de 250 K €/año para este tipo de instalaciones.

CONCLUSIÓN

El desarrollo e implantacion de tecnología hibrida en ciclos combinados, aunque inicialmente atractiva por aumentar significativamente la eficiencia exergetica de los ciclos, se ve negativamente afectada por varios efectos, a destacar: el incremento de los costes asociados de O&MS (Operación y Mantenimiento Solar), la aparición del exitoso mercado de Shale Gas en USA que ha desacoplado del Mercado Global del Gas Natural a precios mas bajos, el reducido coste de mercado de las emisiones de CO₂ actual y la alta volatilidad de los mercados, hacen que el desarrollo de estas tecnologías emergentes, inicialmente atractivas, deban seguir asociadas a apoyos y ayudas financieras, hasta madurar y abaratar costes de inversión en equipamiento y mantenimiento solar que las haga mas competitivas para las empresas de generación de energía eléctrica e inversores.



Enfoque metodológico para la innovación en empresas



Vicente Chulvi
José Ruiz-López
Rosario Vidal

Doctor en Ingeniería Industrial
Lcdo. en Derecho
Doctora en Ingeniería Industrial

Universidad Jaime I. Dpto. de Ingeniería Mecánica y Construcción. Av. Sos Baynat, s/n - 12071 Castellón de la Plana. Tfno: +34 964 729252. chulvi@emc.uji.es; ruizjo@guest.uji.es; vidal@emc.uji.es

Recibido: 10/01/2011 • Aceptado: 09/03/2011

Methodological approach for innovation in enterprises

ABSTRACT

- Innovation in the services sector is one of the new challenges that is generating more interest in the field of developed economies. In such economies, the services sector is clearly showing increasing prominence. In this scenario, remaining competitive is not enough as it is necessary to improve constantly in competitiveness to avoid being displaced by others in the market. Innovation in the services sector introduces a new dimension of knowledge generation which is a theoretical support for the activity of the firms in this area of economy. This article proposes a methodological approach based on a new innovation framework model that includes that new dimension, to which tools for innovation may be applied. The model presented in this article is defended by means of four tools that, historically, have been applied differently to the tertiary sector.
- **Key words:** Decision taking support systems; innovation; innovation framework; innovation tools; services sector.

RESUMEN

La innovación en el sector servicios es uno de los nuevos retos de mayor interés en el marco de las economías más desarrolladas. En dichas economías, el sector servicios está cobrando una importancia cada vez mayor. En este escenario mantener la competitividad no es suficiente, y se hace necesario mejorarla constantemente para evitar ser desplazado por la competencia en el mercado. La innovación en el sector servicios introduce una nueva dimensión de generación de conocimiento que actúa como apoyo teórico de la actividad de las empresas en esta área de la economía.

El presente artículo propone una propuesta metodológica basada en un nuevo modelo marco de innovación que abarca esa nueva dimensión, en el cual se pueden aplicar las herramientas para la innovación. El modelo aquí presentado se defiende mediante la aplicación de cuatro herramientas para la innovación, que han sido históricamente aplicadas de diferente modo en el sector terciario.

Palabras clave: Sistemas de apoyo a la toma de decisiones;

innovación; marco de innovación; herramientas para la innovación; sector servicios.

1. INTRODUCCIÓN

A principios del siglo XX las empresas buscaban la productividad; a mediados de siglo el objetivo cambió hacia la calidad; una vez concluido el siglo las miradas se ciernen en la innovación. Es por ello que numerosos autores han versado sus trabajos en la innovación en los últimos años (Alves et al., 2007; Francis and Bessant, 2005; Magro, 2009; Tether, 2003).

Hoy en día existe un amplio abanico de herramientas que ayudan a las empresas en su objetivo de innovar, desde las más simples y conocidas, como el *Brainstorming* (Osborn, 1953), donde un grupo de gente se reúne para contribuir con ideas, o el *Benchmarking* (Camp, 1989), que trata de la observación de la competencia y copia de sus mejores técnicas, hasta las más complejas y elaboradas, como *TRIZ*, acrónimo ruso de la Teoría de Resolución de

Problemas Inventivos (Altshuller, 1984), o el método *Delphi* (Dalkey, 1967), que consiste en un cuestionario abierto iterativo y retroalimentado respondido por expertos. Existen además un conjunto de herramientas de soporte y gestión de la innovación, como los mapas mentales (Buzan and Buzan, 1999) o la serie de normas UNE 166000. A parte de las mencionadas, existen multitud de técnicas, herramientas o métodos creados para potenciar la creatividad y para guiar y gestionar la innovación (Kwak and Anbari, 2006; Ochôa and Pinto, 2004; Pinedo, 2004; Rivera, 2010): reingeniería de procesos, gestión del cambio, ingeniería concurrente, gestión del conocimiento, mejora continua, diseño para X, análisis modal de fallos y efectos, auditoría tecnológica, análisis del valor, y un largo etcétera. Sin embargo, es fácilmente perceptible que la mayoría de estas técnicas están claramente enfocadas hacia el sector secundario, la industria, que ha sido el motor de la civilización en los últimos siglos.

Con el concepto de globalización y la transferencia de las tareas que requieren de mayor mano de obra, como la agricultura o la manufacturación, a países en vías de desarrollo, el motor de la economía de las ciudades más avanzadas ha recaído en el sector terciario, esto es, los servicios. Este hecho puede ser fácilmente corroborado si se observan los porcentajes de participación del sector servicios en el PIB (Producto Interior Bruto) de países como Estados Unidos, Japón, Alemania y Francia, e incluso en países con una economía menos potente, como España y Portugal. Las cifras superan el 50% de su PIB (OCDE, 2000; INE "Instituto Nacional de Estadística"). Esta realidad económica, con una tendencia al crecimiento continuo, justifica la creación y mejora de técnicas que permitan mejorar la competitividad en la creciente esfera de los servicios. El conocimiento generado por el desarrollo de técnicas de innovación tecnológica presenta una oportunidad sobre la que moldear una nueva generación de herramientas capaces de responder a las necesidades características que surgen en el mundo de los servicios, y permite la creación de un área de innovación (Bharadwaj and Menon, 2000; Hipple, 2003; Jacob et al., 2001).

Actualmente existe un conjunto de marcos de innovación cuyo objeto es el de ofrecer a las empresas un conjunto de directrices para la gestión sistémica de la propia innovación y, al mismo tiempo, una mejora de su capacidad innovadora como un factor de diferenciación sobre la competencia. La aplicación de estos marcos permite el establecimiento de planes estratégicos en la gestión de las empresas para conseguir una innovación constante y renovable basada en el conocimiento y no en el azar (den Hertog, 2000). A pesar de ser una poderosa herramienta para mejorar la gestión de una empresa y su capacidad innovadora, los marcos de innovación están diseñados inicialmente para su posible aplicación en cualquier tipo de organización, pública o privada, independientemente de su tamaño o actividad, siguen siendo una herramienta potente para mejorar la gestión de una organización y su capacidad para innovar. Por esta razón y en ciertos casos, la extensión de su concepto y de

dónde pueden ser potencialmente aplicadas se perfila como un obstáculo para encontrar y definir soluciones concretas.

Por esta razón, entre otras, numerosos autores trabajan en cómo adaptar las técnicas y métodos de innovación al campo de la gestión y los negocios. Estos trabajos no incluyen sólo aquellas técnicas fácilmente extensibles a otros campos, como son el *Brainstorming* o el *Benchmarking*, que realmente ya se están aplicando en el sector terciario (Camp, 1995), sino que incluyen también otras técnicas más complejas de extrapolar (Caamaño Ponte et al., 2005; Green et al., 1990). Incluso técnicas creadas inicialmente por y para el sector industrial son actualmente objeto de estudio para ser adaptadas al sector servicios, como es el caso de *TRIZ* (Domb and Mann, 1999; Mueller, 2005; Retseptor, 2003; Souchkov, 2007).

En el presente trabajo se presenta una metodología que pretende actuar como una herramienta estratégica para las empresas del sector servicios, capaz de ayudarles a mejorar e innovar en su actividad. La parte central de la metodología es un marco de innovación creado por los autores para tal efecto (Chulvi and Ruiz-López, 2008), que permite que una serie de herramientas para la innovación tradicionales sean aplicadas para detectar problemas y solucionarlos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. MARCO DE INNOVACIÓN

El marco de innovación propuesto, tal y como puede verse en la Fig. 1, es una variación del modelo original de Den Hertog (2000). Presenta tres dimensiones en las que se puede dar la innovación en la actividad del sector terciario. Las tres están interrelacionadas, pero a su vez cada una de ellas está dividida en tres sub-dimensiones, las cuales también presentan vínculos entre ellas. Una cuarta dimensión, la dimensión tecnológica, se superpone sobre las otras tres, y representa las opciones tecnológicas a las que una empresa puede recurrir para contribuir a la innovación de un servicio.

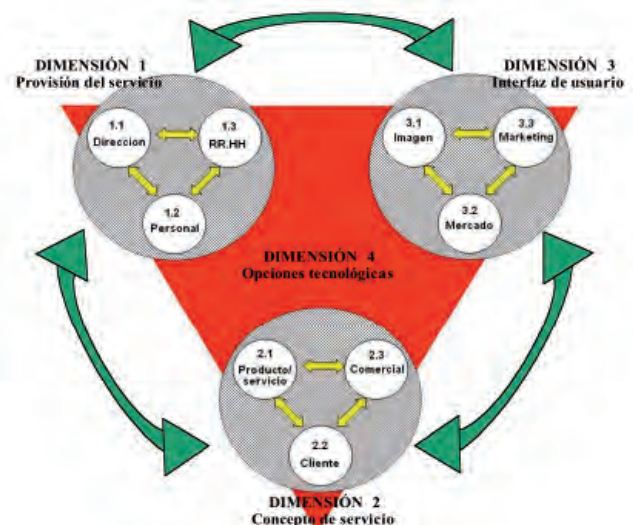


Figura 1: Marco de innovación propuesto para el sector servicios

La llamada dimensión 1, el **sistema de provisión del servicio**, se refiere a la empresa en sí, su estructura, sus elementos y cómo funciona. Esto se representa con las sub-dimensiones relativas a la dirección (1.1), donde recae la toma de decisiones a más alto nivel, el personal (1.2), que ejecuta las acciones de la empresa, y los recursos humanos (RR.HH.) (1.3), que está al cargo de la gestión del personal de la empresa. Del mismo modo, las interacciones entre las sub-dimensiones hacen referencia al modo de interactuar entre ellas, es decir, el tipo de acciones que la dirección realiza con RR.HH., cómo las lleva a cabo y los medios que utiliza para tal efecto.

La dimensión 2, el **concepto de servicio**, hace referencia al producto que ofrece la empresa, su propósito y el beneficio que obtiene de él. Las sub-dimensiones consideradas en este punto son el producto o servicio en sí (2.1), el cliente (2.2) no como individuo sino como grupo de mercado que adquiere el producto, y finalmente el comercial (2.3), que representa el quién y cómo provee un servicio demandado por un cliente. Esta última sub-dimensión es la que ejerce de vínculo entre las dimensiones 1 y 2, como parte del personal incluido en la sub-dimensión 1.2 cuya función es llevar a cabo las tareas requeridas en la sub-dimensión 2.3.

La dimensión 3, la **interfaz de usuario**, representa la “apariencia” externa de la empresa, y cómo ésta se relaciona y capta clientes. La primera de sus sub-dimensiones, imagen (3.1), representa la visión externa de la empresa. Con ella tenemos el mercado (3.2) que se relaciona con la sub-dimensión cliente (2.2), pero mientras que el cliente se refiere solamente a la parte del mercado que adquiere el servicio, el mercado se refiere a todo el conjunto de clientes, tanto reales como potenciales. La sub-dimensión 3.3, llamada *marketing*, se entiende como el grupo de personal de la empresa encargada de presentar la imagen de la ésta al mercado. Por lo tanto, la sub-dimensión 3.3 está relacionada con la 1.2.

Por último, la dimensión 4, **opciones tecnológicas**, representa los recursos tecnológicos de que dispone la empresa, tal y como su nombre indica. Dichos recursos no están relacionados directamente con una de las dimensiones anteriores en particular. En lugar de ello, una vez una tecnología ha sido adquirida por la empresa, ésta puede ser aplicada a cualquier dimensión. La dimensión 4 no se superpone sobre la totalidad de las otras tres, ya que algunas de las tareas que implican pueden ser realizadas sin necesidad de actuar a nivel tecnológico. Por ejemplo, una vez que la empresa adquiere la tecnología de “correo electrónico” puede aplicarla en cualquiera de sus tres dimensiones: la dirección puede usarla para comunicarse con los empleados, el comercial para dirigirse a los clientes y marketing puede anunciar la compañía a través de correos electrónicos publicitarios. Pero del mismo modo, un miembro de la dirección puede optar por dar instrucciones a sus subordinados en persona, prescindiendo totalmente de la tecnología adquirida.

Herramientas para la innovación

Para el presente trabajo se han escogido cuatro herramientas para la innovación diferentes: *Brainstorming*, *Benchmarking*, cuestionarios *Delphi* y *TRIZ*. La selección se ha realizado teniendo en cuenta las escasas similitudes entre ellas y la diferente forma en que han sido aplicadas históricamente al sector servicios.

Brainstorming (Figura 2) es un grupo de trabajo que proporciona nuevas ideas en torno a un tema o problema concreto. Esta herramienta, creada por Osborne (1953) cuando en su búsqueda de ideas creativas descubrió que un proceso interactivo con un grupo no estructurado proporcionaba más y mejores ideas que el trabajo individualizado. La principal regla del método consiste en no juzgar las ideas mientras éstas se generan. En principio, todas son válidas y ninguna debe ser rechazada, ya que muchas de ellas, que a menudo demuestran ser útiles, son rechazadas de un modo temprano debido a prejuicios u observaciones subjetivas. El *Brainstorming* busca la cantidad frente a la supuesta calidad, lo que permite la originalidad y creatividad. Un análisis posterior de las soluciones determinará la validez cualitativa de los resultados proporcionados por la técnica.



Figura 2: Brainstorming

Benchmarking (Figura 3) puede ser definido como un análisis comparativo de los procesos aplicados en un área específica con el objeto de mejorar el estado inicial de la misma. En otras palabras, *Benchmarking* consiste en el análisis de las mejoras existentes en el sector para utilizarlas como referencia en la mejora de la empresa propia. Se establece como un proceso continuo utilizado en la gestión estratégica, donde las empresas líderes son tomadas como punto de referencia. El primer paso a seguir consiste en determinar en qué aspectos se pretende evolucionar, para detectar qué empresas llevan a cabo las mejores técnicas en dichas áreas (concepto de excelencia) e investigar dichas empresas en cuestión para aplicar esas mismas técnicas en la propia organización, estableciéndolas como punto de referencia a alcanzar o mejorar.



Figura 3: Benchmarking

El método *Delphi* (Figura 4), desarrollado en la década de los 1950 (inicialmente con fines militares), se ha defendido como efectivo hasta la fecha en varias áreas de conocimiento, y ha sido constantemente aplicado en diferentes estudios con el objeto de extraer el conocimiento, la experiencia y la visión de un grupo de expertos en un tema dado. Sus principales características son:

- Facilita un proceso de comunicación grupal entre un conjunto de individuos para lidiar con problemas complejos.
- Gracias al conocimiento adquirido y su retroalimentación (normalmente anónima), permite un consenso general para determinar o detectar los aspectos más importantes o procesos clave de un tema específico.
- El consenso alcanzado está directamente relacionado con la decisión (prospección) de cuando las variables detectadas podrán ser alcanzadas o aplicadas dentro de una escala temporal (futuro).
- Facilita y promueve los procesos creativos en los individuos a través de la retroalimentación del conocimiento de los participantes.



Figura 4: Delphi

TRIZ (Figura 5) comenzó hace más de seis décadas con la hipótesis de que existen unos principios inventivos universales que son la base para las creaciones innovadoras que hacen avanzar la tecnología, y que estos principios pueden ser identificados y codificados para hacer el proceso

inventivo más previsible. Desde entonces hasta hoy, más de dos millones y medio de patentes han sido analizadas y clasificadas para conocer sus principios de innovación, para concluir en la elaboración un conjunto de herramientas para guiar en el proceso de generación de ideas y búsqueda de soluciones innovadoras para resolver problemas. Más que una simple metodología, consiste en un conjunto de herramientas basadas en el conocimiento para ser aplicadas en la formulación de problemas, análisis del sistema, resolución de contradicciones y evolución tecnológica.

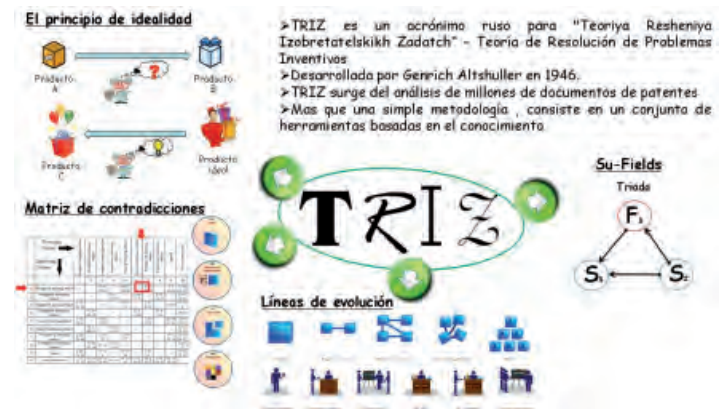


Figura 5: TRIZ

3. METODOLOGÍA

En relación con la innovación en el sector servicios se han definido en el presente trabajo cinco pasos básicos con el objeto de optimizar los resultados:

1. Recopilar información
2. Procesar información
3. Detectar problemas
4. Buscar soluciones para el problema detectado
5. Incluir las soluciones en el marco de innovación propuesto anteriormente (Figura 1).

La información a recopilar en el primer punto se refiere a la de la propia empresa. Es esencial obtener la información desde todas las perspectivas posibles, consiguiendo la objetividad mediante la obtención del máximo de información, evitando cualquier tipo de filtrado. Ninguna de las herramientas para la innovación propuestas ha sido creada para este propósito, ya que éste se considera el punto de partida para poder aplicarlas. Para poder conseguir información completa se deben realizar entrevistas personales con el personal de diversos departamentos y niveles, así como con miembros de la directiva y con clientes, tanto reales como potenciales. Como fuentes de información pueden servir tanto los informes anuales de la empresa, como su portal de internet, redes sociales, o su publicidad.

Después de la fase de recopilación de información, se espera tener una pila de datos que deben ser organizados en función de la herramienta de innovación que será utilizada a continuación. Puesto que esta información que tenemos

disponible representa el punto de partida en que no sólo se buscarán los problemas que afectan a la empresa, sino también las soluciones a los mismos y las propuestas de mejora para la misma, es lógico organizar dicha información de acuerdo con el marco de innovación propuesto. En las herramientas que fundamentalmente dirigen la búsqueda para problemas concretos, como el *Brainstorming* y el *Benchmarking* en principio, esta forma de organizar la información en cuatro dimensiones debe ser suficiente. Por el contrario, herramientas de un tipo más abierto, como *Delphi*, requieren de un análisis de la información más profundo, ya que el objetivo de este punto no es la búsqueda de problemas individuales, sino una comprensión profunda del sector en que opera la empresa para ser capaces de formular un cuestionario la más completo posible. Otros métodos, como *TRIZ*, poseen sus propias herramientas para el procesado de la información (matriz de recursos y restricciones, análisis funcional, etc).

La detección de problemas será tratada de un modo diferente de acuerdo con la herramienta que sea utilizada, ya que la información ya ha sido tratada de modo diferente de acuerdo con la herramienta para la innovación a utilizar. Así, los problemas que afectan a la empresa pueden ser detectados directamente analizando la información organizada en el marco de innovación. Por lo tanto, se puede redactar una lista de problemas a los que buscar solución, equivalente a las variables significativas del *Benchmarking*. Otro caso es el uso de *TRIZ*, dónde los problemas no surgen de un análisis directo de la información, sino que son definidos como contradicciones que surgen de un análisis funcional o como déficits observados en un análisis del estado de evolución de la empresa en su sector. Por otro lado, el cuestionario *Delphi* omite directamente la fase de detección de problemas, ya que plantea un cuestionario abierto una vez se ha definido

el sector de operación sobre el que los expertos plantearán sus propuestas de innovación sin enfocar ningún problema en particular.

Puesto que para cada metodología se ha seguido un camino diferente para la búsqueda de soluciones, es lógico que los resultados obtenidos con cada una de ellas también difieran. Así pues, del *Brainstorming* se obtienen diversas soluciones que deben ser cuidadosamente seleccionadas, mientras que el *Benchmarking* proporcionará las mejores soluciones empleadas con éxito por la competencia. Aunque esta última no presente un nivel de innovación tan elevado en sus soluciones como el *Brainstorming*, nos garantiza una mayor eficacia, puesto que la idea ya ha sido empleada con éxito en el sector. Por su parte, *TRIZ* ofrece ideas y conceptos radicales para problemas indirectos que pueden haber sido pasadas por alto por las técnicas anteriores. Los cuestionarios *Delphi*, a su vez, proporcionarán sugerencias válidas para el sector, sin tener en consideración ningún problema específico que la empresa pudiera tener.

Por último, y con el objeto de combinar todos los resultados para poder aplicarlos adecuadamente, las soluciones obtenidas con los diferentes métodos se organizarán de acuerdo con el marco de innovación propuesto. Además de su correcta organización y su consecuente aplicación, esto permite a las innovaciones conseguidas ser extrapoladas de una dimensión a otras siguiendo las relaciones entre las diferentes sub-dimensiones, y hacer así un buen uso de la propiedad de superposición de la dimensión 4 (opciones tecnológicas) sobre las otras tres para extender una innovación tecnológica de una dimensión al conjunto entero de la empresa. La Tabla 1 resume los cinco pasos básicos descritos en este punto aplicado a las cuatro metodologías propuestas.

	Brainstorming	Benchmarking	TRIZ	Delphi
1 - Recopilar información	Información específica de la empresa			Información global del sector
2 - Procesar información	Organizar la información dentro del modelo marco de innovación		Herramientas propias para el procesado	Estado del sector de la empresa
3 - Detectar problemas	Problemas específicos en sub-sistemas	Variables significativas sobre las que realizar el análisis	Búsqueda de contradicciones, estado evolutivo, comportamientos no deseados...	
4 - Buscar soluciones	Conjunto de soluciones creativas válidas para cada problema específico	Soluciones óptimas ya existentes en el sector	Conceptos radicales como soluciones innovadoras para problemas indirectos	Ideas innovadoras propuestas por expertos
5 - Incluir las soluciones en el marco de innovación	Clasificación de las ideas y soluciones encontradas en el marco de innovación Extrapolación de los aportes a otras dimensiones del marco			

Tabla 1: Aplicación de las herramientas de innovación sobre los pasos básicos para la innovación de la metodología propuesta

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente trabajo muestra dos propuestas paralelas para mejorar la innovación en el sector servicios. La primera de ellas es la variación sobre el marco de innovación propuesto por den Hertog (2000), añadiendo el nuevo concepto de dimensión tecnológica y definiendo de un modo más preciso las diferentes sub-dimensiones en un intento de lograr una mayor adaptabilidad de cara a los diferentes tipos de empresas englobadas en el sector servicios. La segunda propuesta consiste en la metodología de cinco pasos para una mejor adaptación de las diferentes herramientas para la innovación a las empresas del sector servicios.

Inicialmente, la dimensión tecnológica propuesta por den Hertog junto a las otras dimensiones se presenta como una opción externa al global. Esto es, la tecnología no precisa de su presencia en la empresa cuando se habla de innovación en el sector servicios. La dimensión tecnológica se entiende más bien como un área del conocimiento a la que acudir en busca de ayuda en casos puntuales, cuando emerge un problema específico y se considera que la tecnología existente puede solucionarlo. No obstante, uno de los resultados del presente trabajo sobre la mejora de las técnicas para mejorar la innovación en el sector servicios ha sido el perfilar un nuevo marco de innovación. Las investigaciones nos han llevado en esta dirección después de detectar las áreas clave en las que es posible innovar en el sector servicios (ver Figura 1). En nuestro marco de innovación se han definido cuatro dimensiones: tres de ellas están interrelacionadas y contienen a su vez tres sub-dimensiones. La cuarta dimensión representa las opciones tecnológicas como algo integrado en la empresa, sin olvidar que también es posible la innovación sin tecnología en el sector servicios. El nuevo concepto que representa este modelo de cuatro dimensiones se basa en la posibilidad de extrapolar una tecnología que ya está siendo aplicada en una sub-dimensión específica del modelo a otra, o incluso a todas ellas. De este modo, una tecnología concreta que ha sido incluida en un punto para dar respuesta a una necesidad específica puede ser adaptada y extendida para mejorar otros aspectos en los cuales toma parte la empresa. Por ejemplo, si una empresa incorpora el uso de videoconferencias en la dimensión 1 para solventar el problema de poder hacer reuniones entre directivos de diferentes sedes, esta misma tecnología se puede tener en cuenta para mejorar otras dimensiones, como por ejemplo las relaciones entre vendedores y clientes.

Además de redefinir las dimensiones del marco de innovación, en el presente trabajo se ha asociado el marco con el uso de una serie de herramientas de innovación, definiendo una metodología de cinco pasos que sirve de apoyo para la búsqueda de innovaciones en el sector servicios (ver Tabla 1). Para defender esta metodología se han considerado cuatro herramientas, *Brainstorming*, *Benchmarking*, *TRIZ* y *Delphi*, seleccionadas por sus escasas similitudes entre ellas y por su diferente aplicación histórica sobre el sector servicios. Sin embargo, es necesario señalar que la metodología propuesta no queda limitada a

estas cuatro herramientas, sino que permite adaptar al sector servicios la herramienta para la innovación que mejor se adapte a las necesidades del usuario en cada caso. El punto fuerte de la presente metodología radica precisamente en este punto, su adaptabilidad. Esto conlleva a una maximización del nivel de innovación para las soluciones encontradas y a un movimiento de las incorporaciones innovadoras sobre las diferentes dimensiones de la empresa, lo que proporciona una ventaja competitiva sobre el resto de las empresas.

Tanto el marco como la metodología para la innovación en el sector servicios presentados en el presente artículo han sido probadas con éxito sobre diferentes empresas del sector terciario. Puesto que las soluciones específicas no pueden ser expuestas por motivos de confidencialidad, los resultados aquí expuestos se presentan en términos generales, con la única finalidad de defender tanto el marco como la metodología propuestos.

En primer lugar se hace necesario recopilar la mayor cantidad de información posible de la empresa. Así, una primera visión global de la empresa se obtiene del consejo de administración. La información se completa con diversas fuentes como entrevistas y cuestionarios con personal de diferentes niveles y localizaciones geográficas (ver extracto de entrevista con un mando intermedio en la Tabla 2), clientes presentes (Tabla 3) y pasados (Tabla 4), clientes de la competencia, expertos en la materia (cuestionarios *Delphi*, Tabla 5) y de diferentes fuentes de internet, como los portales web de la propia empresa y de la competencia, redes sociales, foros profesionales, etc.

Entrevistado	... la adaptación a la nueva dirección, a los nuevos mandos, bueno pues... esta siendo difícil... por problemas de comunicación... básicamente... entonces el equipo... la verdad es que es muy trabajador, muy trabajador, y tira adelante porque son muy responsables, pero no hay motivación.
Entrevistador	En los problemas de comunicación ¿Qué se está haciendo?
Entrevistado	De arriba abajo, de arriba abajo... porque ellas, vamos a ver... son personas dispuestas, muy jóvenes, muy jóvenes, entre 27 y 30 años, o sea, muy jóvenes...
Entrevistador	O sea, que no vienen de la antigua estructura
Entrevistado	No, vamos... ojalá alguna vez... pero vamos, son personas muy jóvenes, no se quejan de la velocidad de la empresa, lo único que quieren es que se les reconozca...

Tabla 2: Extracto de entrevista con un mando intermedio de la empresa

En general, ¿Cómo valora el servicio prestado por la compañía?			
Deficiente	Regular	Bueno	Excelente
Valoración general del servicio prestado por su agente comercial:			
Deficiente	Regular	Bueno	Excelente
Valoración general sobre el servicio post-venta:			
Deficiente	Regular	Bueno	Excelente

Tabla 3: Extracto de la encuesta de satisfacción del cliente

Valore la gestión realizada en la recuperación de impagos en nuestra compañía:				
Tiempo:				
Rápida		Normal		Lenta
Eficacia:				
Eficaz		Normal		Poco eficaz
Esta gestión, en su actual empresa es:				
Más rápida		Similar		Más lenta
Más eficaz		Similar		Menos eficaz

Tabla 4: Extracto del cuestionario a clientes perdidos

1. Con visión de futuro... ¿Qué factores de riesgo considera usted que afectarán a las empresas españolas en los próximos 10 años?
2. ¿Cuáles son los principales atributos y/o características de los productos que las aseguradoras le ofrecen actualmente a su empresa?
3. ¿Cuáles considera usted que serán los principales atributos y/o características de valor que los seguros deberán ofrecer a su empresa en los próximos 10 años?
4. ¿Qué servicios complementarios o adicionales que aportan valor agregado al seguro son los que usted más aprecia en una relación con una aseguradora?
5...

Tabla 5: Extracto del cuestionario Delphi

Esta información ha sido proporcionada a diferentes expertos en herramientas para la innovación, que han trabajado aislados de los otros expertos. Así, con los mismos datos iniciales, cada herramienta para la innovación ha trabajado en los tres pasos siguientes (procesado, detección de problemas y resolución de problemas), y sus soluciones han sido introducidas en el marco de innovación propuesto. Llegados a este punto se ha procedido a analizar y comparar los resultados obtenidos con cada una de ellas. Las diferencias y

similitudes pueden ser apreciadas en la Tabla 6, mientras que las conclusiones individuales han sido las siguientes:

Brainstorming:

- Grado de innovación de las soluciones altamente dependiente de las personas participantes.
- Rango completo de innovación en las ideas: desde nada innovadoras hasta altamente innovadoras.
- Los resultados proporcionan solución a los problemas planteados, pero pueden surgir mejoras en otros aspectos.
- Alta similitud a las soluciones alcanzadas con la metodología *Delphi*.

Benchmarking:

- No hay innovaciones radicales. Todas las soluciones han sido empleadas ya por la competencia.
- Puede no existir solución para un aspecto concreto.
- Normalmente las soluciones se centran en los problemas planteados. No obstante, pueden surgir mejoras en aspectos relacionados con la empresa.
- No existe un ratio de similitud relevante con el resto de herramientas para la innovación. El ratio con *Delphi* es ligeramente más bajo que con el resto.

Delphi:

- A pesar de que el nivel de innovación está condicionado a la gente que prepara el cuestionario y a la que lo responde, puesto que se considera que ambos grupos son expertos en la materia, las soluciones encontradas acostumbran a tener un alto grado de innovación.
- La mayoría de las soluciones están condicionadas por los aspectos preguntados del cuestionario.
- El mayor ratio de similitud aparece al compararlo con el *Brainstorming*. Este hecho es lógico puesto que se puede considerar el *Delphi* como un *Brainstorming* guiado llevado a cabo por expertos aislados.

TRIZ:

- La mayoría de las soluciones tienen un alto nivel de innovación.
- Todas las soluciones corresponden a problemas planteados.
- Presenta un nivel de similitud bajo con cualquiera de las otras metodologías consideradas.

5. CONCLUSIONES

En el presente siglo, la innovación tecnológica es un concepto estrechamente relacionado con el sector servicios. Por esta razón, este sector presenta una demanda creciente de herramientas para innovar. El marco de innovación propuesto en el presente artículo se muestra como una herramienta asistencial para organizar el proceso innovador de una empresa de sector terciario, desde la estructuración

Herramienta de innovación	Soluciones			Ratio de similitud							
	Total	Originales	%	Brainstorming	Benchmarking	Delphi	TRIZ				
Brainstorming	20	9	45%	-	-	4	20%	8	40%	4	20%
Benchmarking	19	12	63%	4	21%	-	-	3	16%	4	21%
Delphi	18	8	44%	8	44%	3	17%	-	-	5	28%
TRIZ	28	21	75%	4	14%	4	14%	5	18%	-	-

Tabla 6: Soluciones y ratio de similitud de las herramientas de innovación empleadas.

del conocimiento de la misma hasta la gestión de las nuevas innovaciones incorporadas. El modelo permite un mejor uso de los recursos de la empresa en cuanto a dirigir sus esfuerzos hacia las áreas en las que se requieren mayores mejoras, y además permite extrapolar las innovaciones encontradas para una sub-dimensión específica al global de la empresa.

Del mismo modo, en este artículo se ha mostrado como un conjunto de herramientas para la innovación, con diferente grado de aplicación histórica al sector servicios, ha sido utilizado sobre dicho sector auxiliado por el marco de innovación, gracias a la metodología propuesta. Con ello ha sido posible corroborar que tanto el marco de innovación como la metodología funcionan para un amplio rango de herramientas para la innovación, muchas de ellas creadas inicialmente para su uso en sectores diferentes. Por esto se espera que ambos sean útiles a su vez con el resto de técnicas, metodologías y herramientas para la innovación existentes. Así pues, en futuros trabajos se comprobará esta defendida utilidad sobre el resto de herramientas para la innovación, así como la aplicabilidad de las diferentes herramientas sobre el sector servicios.

En el presente trabajo se ha analizado la utilidad de las diferentes herramientas de innovación para proporcionar soluciones en el sector servicios, y para ello se ha considerado la cantidad de soluciones alcanzadas, la variedad de las mismas y el grado de similitud de resultados entre las diferentes metodologías propuestas. En futuros trabajos se pretende analizar también el grado de innovación alcanzado y la eficacia de dichas soluciones.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Altshuller G. *Creativity as an Exact Science: The Theory of the Solution of Inventive Problems*. Luxembourg: Gordon and Breach Science Publishers, 1984. ISBN 0-677-21230-5 3.
- Alves J, Marques MJ, Saur I, et al. "Creativity and innovation through multidisciplinary and multisectoral cooperation". *Creativity and Innovation Management*. 2007. Vol. 16, p.27-34.
- Bharadwaj S, Menon A. "Making innovation happen in organizations: individual creativity mechanisms, organizational creativity mechanisms or both?" *The Journal of Product Innovation Management*. 2000. Vol. 17, p.424 - 434.
- Buzan T, Buzan B. *El libro de los mapas mentales: Cómo utilizar al máximo las capacidades de la mente*. Logroño: Ediciones Urano, 1999. ISBN : 84-7953-146-0
- Caamaño-Ponte J, Donis L, Fernández P, et al. *Servicios sociales especializados para personas mayores en Galicia. Resultados de un estudio prospectivo Delphi*. AGATHOS:

- Atención Sociosanitaria y Bienestar, 2005. pp.26-34. ISSN: 15783103
- Camp RC. *Benchmarking: the search for industry best practices that lead to superior performance*. Milwaukee (USA): Amer Society for Quality, 1989. ISBN 0-87389-058-2
- Chulvi V, Ruiz-López J. *La dimensión tecnológica para la innovación en la empresa*. En: XII Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos (AEIPRO). Zaragoza, 8-11 July 2008. ISBN: 978-84-936430-3-4
- Dalkey, NC. *Delphi*. Santa Monica, California: The Rand Corporation, 1967. RM-5888-PR
- den Hertog P. "Knowledge-intensive business services as co-producers of innovation". *International Journal of Innovation Management*. 2000, Vol. 4, p.491-528.
- Domb E, Mann D. "40 inventive (business) principles with examples". *The TRIZ Journal*. Septiembre 1999.
- Francis D, Bessant J. "Targeting innovation and implications for capability development". *Technovation*. 2005, Vol.25, p.171-183.
- Green H, Hunter C, Moore B. "Application of the *Delphi* technique in tourism". *Annals of Tourism Research in engineering design*. 1990, Vol.17, p.270 - 290.
- Hipple J. "So, you want to start an innovation effort". *Research Technology Management*, 2003, Vol.46, p.11-13.
- Jacob M, Tintoré J, Torres X. *Innovación en servicios*. Informe del proyecto: Innovación en el sector turístico Balear. Análisis prospectivo de Tecnologías. Madrid: Fundación Cotec, 2001.
- Kwak YH, Anbari FT. (2006) "Benefits, obstacles, and future of six sigma approach". *Technovation*. 2006, Vol.26, p.708-715.
- Magro Montero E. "Innovación socialmente responsable - Social responsible innovation" *Dyna*. 2009, Vol.84.
- Mueller S. "The *TRIZ* resource analysis tool for solving management tasks: previous classifications and their modification". *Creativity and Innovation a Management*. 2005, Vol.14, p.43-58.
- Ochôa P, Pinto LG. "Aprender a innovar: guía para o desenvolvimento de competências de gestão para os profissionais de informação e documentação". BAD, Lisboa, 2004. ISSN: 0007-9421
- Osborn, A. *Applied imagination: principles and procedures of creative thinking*. New York: Charles Scribner's Sons, 1953. ISBN 978-0023895203
- Bakouros YL, Demetriadou VM. "Herramientas de gestión de la innovación". (http://www.cein.es/pdf_documentacion/innovacion/herramientas12.pdf). University of Thessaly, Greece. INNOMAT, 2004
- Rivera J, Vidal R, Chulvi V, Lloveras J. "La transmisión visual de la información como estímulo cognitivo de los procesos creativos". *Anales de Psicología*. 2010, Vol.26-2, p. 226-237.
- Retseptor G. "40 inventive principles in quality management". *The TRIZ Journal*. March 2003.
- Souchkov V. "Breakthrough thinking with *TRIZ* for business and management: An overview". Netherlands: ICG Training & Consulting, March 2007. (www.xTRIZ.com)
- Tether BS. *What is innovation?* University of Manchester and UMIST, Manchester (UK): ESRC Centre for Research on Innovation and Competition (CRIC), 2003. ISBN 1 84052 010 8

Modelo para la evaluación y mejora del rol estratégico de plantas productivas.

Caso de una red global de operaciones



Miguel Mediavilla*
Ander Errasti**
Rosario Domingo*

Ing. en Organización Industrial
Dr. Ingeniero Industrial
Dra. Ingeniera Industrial

* UNED. Dpto. de Ingeniería de Construcción y Fabricación, C/ Juan del Rosal, 16 – 28040 Madrid. Tfno: +34 91 3986455. miguel.mediavilla@gmail.com; rdomingo@ind.uned.es

** TECNUN. ETSII. Dpto. de Organización Industrial. Paseo Manuel Lardizábal, 13 – 20008 San Sebastian. Tfno: +34 943 219877. aerrasti@tecnun.es

Recibido: 22/11/2010 • Aceptado: 05/06/2011

Framework for evaluating and upgrading the strategic plant role. Case study within a global operations network

ABSTRACT

- The current international business environment demands to industrial companies to adapt their operations to an ever more increasing global playground. The sourcing, manufacturing and supplying should therefore evolve from a traditional vertically integrated supply chain to a worldwide spread network, which is able to efficiently respond to markets. However, companies face difficulties with finding a structured approach for designing or restructuring their operations networks. This article shows one of the first case studies in a global multiplant and multiproduct operations network, where it will be tested the goodness of a framework that systematically assess the strategic factory role of within its a global operations network. The framework evaluates the current status regarding the strengths and weaknesses, as well as the strategic plant role. These are the basis for deploying an improvement roadmap to push the plant competences, depending on the targeted new plant strategic role, either by the plant itself or by the product area/company. The applicability of the model will be checked via a case study, providing additionally if the application of this framework can support a better competitive performance in a plant.
- **Keywords:** global operations network, strategic factory role, case study, manufacturing strategy.

RESUMEN

El actual entorno económico está en constante cambio, obligando a las compañías industriales a adaptar sus operaciones productivas y logísticas a escenarios cada vez más globales. El aprovisionamiento, la fabricación y la distribución deben, por tanto, evolucionar de un enfoque tradicional de cadena de suministro integrada verticalmente a una red global dispersa, pero coordinada, que sea capaz de responder eficientemente a los mercados. Sin embargo las compañías afrontan severas dificultades para adoptar un enfoque estructurado a la hora de diseñar o reestructurar sus redes de plantas productivas. Este artículo propone uno de los primeros estudios de caso en una red global multiplanta y multiproducto, en el cual se testará la bondad de un modelo que evalúa sistemáticamente el rol estratégico de una planta productiva dentro de la red global multiplanta de la empresa. Esta evaluación permite identificar las fortalezas y debilidades de cada planta productiva,

así como el rol estratégico actual. Todo ello sirve de punto de partida para desplegar un plan de mejora de desarrollo de competencias en la planta teniendo en cuenta el nuevo rol que la planta (o unidad de producto o empresa en la que se integre) pretenda. Mediante un estudio de caso se comprueba la bondad de este modelo, así como si la aplicación de este modelo puede ayudar a mejorar la competitividad de las plantas productivas.

Palabras clave: Red global de operaciones, rol estratégico de planta, estudio de caso, estrategia de fabricación.

1. INTRODUCCIÓN

La dirección de operaciones es un área de negocio relacionada con la producción de bienes y servicios, e implica la responsabilidad de garantizar que las actividades productivas y logísticas de la empresa sean eficaces (cumpliendo con requisitos de clientes) y eficientes

(utilizando la mínima cantidad de recursos).

Con la aparición de fuentes de suministro y fabricación globales y de mercados globalizados, el diseño de redes de operaciones tiende a abarcar múltiples regiones que cada vez son más extensas y, por ende, con mayor complejidad. La internacionalización de las operaciones se ha convertido en una tendencia especialmente común entre las empresas, principalmente multinacionales, pero cada vez más intensa en pequeñas y medianas empresas (Corti *et al.*, 2009).

Algunos autores subrayan (Ernst y Kim, 2002) que una de las principales consecuencias de la globalización económica consiste precisamente en el desarrollo de las redes globales de operaciones, más allá de cualquier límite geográfico o accionarial. Ferdows (1997) ya apuntaba que el construir y gestionar redes integradas de operaciones era el próximo reto en el ámbito de la gestión de operaciones: reto que aún hoy en día permanece abierto (De Toni y Parusini, 2010).

Sin embargo la literatura existente sobre cómo diseñar o reestructurar una red global de operaciones es escasa y los aspectos de estudio están muy dispersos (Corti *et al.*, 2009). Existen herramientas de evaluación (por ejemplo EFQM) que habitualmente se utilizan en empresas de todos los sectores; sin embargo su utilización se limita a la unidad evaluada, sin

ofrecer un acercamiento orientado, por ejemplo, a una red de plantas productivas.

Ferdows (1989, 1997) propone unos criterios de clasificación dentro de una red global de operaciones - cualquier planta en una serie de roles predefinidos a cualquier planta productiva - basándose en el grado de competencias y en el factor estratégico de su localización (Figura 1).



Figura 1: Matriz de posicionamiento de los roles de planta según nivel de competencias y factor estratégico para la localización de planta (Ferdows, 1997)

ROL DE PLANTA PRODUCTIVA	CARACTERÍSTICAS
OFF-SHORE	Fabrica componentes o productos finales específicos a bajo coste. Las inversiones en instalaciones y recursos para su gestión son mínimos. Capacidades limitadas en el desarrollo de producto e ingeniería. No suelen decidir en la elección de proveedores ni en la negociación de precios de compra. El área económica básicamente reporta datos a la casa matriz. La logística de distribución es limitada, y fuera del control de la dirección de planta.
SOURCE	Su objetivo principal es la búsqueda del bajo coste, pero su equipo de gestión tiene una mayor responsabilidad sobre el aprovisionamiento (incluyendo la selección de proveedores), planificación de producción, logística de distribución, mejoras en proceso, así como la personalización/rediseño de productos. Tiene la misma capacidad para fabricar un producto final o componente que la mejor planta de la red. Tienden a localizarse en países de bajo coste laboral, infraestructuras desarrolladas y con trabajadores formados.
OUTPOST	Su tarea principal es recopilar información, dado que suelen situarse en áreas donde existen proveedores avanzados, competidores, centros de investigación o clientes. Tienen un rol estratégico secundario desde el punto de vista de fabricación.
LEAD	Crea nuevos procesos, productos y tecnologías para toda la compañía. Potencia las competencias locales y los recursos tecnológicos para adquirir y transformar información sobre productos o procesos. Tiene una participación decisiva en la elección de proveedores estratégicos y participa frecuentemente en desarrollos conjuntos con estos. Está en contacto directo con clientes finales, proveedores de instalaciones y centros de investigación. Realiza innovaciones habitualmente.
SERVER	Abastece mercados nacionales o regionales concretos. Su ubicación persigue reducir impuestos y costes logísticos, aranceles y fluctuaciones de tipo de cambio. Competencias limitadas en el rediseño de productos y de procesos de fabricación.
CONTRIBUTOR	Abastece mercados nacionales o regionales concretos. Competencias en ingeniería de producto, de procesos y de producción, así como en la elección de proveedores, incluidos los clave para la empresa. Compite internamente con plantas ubicadas en el país de la casa matriz en la realización de pruebas piloto sobre tecnologías de procesos, sistemas informáticos, y diseño de productos.

Tabla 1: Características de los roles de planta propuestos por Ferdows (1989, 1997)

Mediante esta clasificación se definen los roles de una planta dentro de una red productiva. Sin embargo, el despliegue a la operativa del aprovisionamiento, producción y distribución no ha sido explícitamente desarrollado (Vereecke y Van Dierdonck, 2002). Ello provoca que cualquier intento para diseñar o reestructurar una red de plantas productivas basado en la clasificación de Ferdows sea dificultoso de poner en práctica, dado que el concepto del rol de una planta es complejo de evaluar, formular, priorizar y desplegar – situación paradójica, dado que se reconoce que las plantas con roles estratégicos más elevados tienen menor probabilidad de desaparecer de las redes multiplanta (Vereecke, 2007).

Este artículo propone una extensión del *modelo de Ferdows* a través de un modelo de evaluación del rol estratégico de planta. La aplicabilidad del modelo será verificado en 34 plantas productivas de la red global de operaciones multiproducto de una compañía multinacional del sector de bienes de consumo. Asimismo extenderá la aplicabilidad de la clasificación de *Ferdows* al comprobar si la propuesta facilita lo siguiente: 1) Despliegue de un plan de mejora que proporcione una elevación gradual del rol de una planta dentro de su red de operaciones, basado en el resultado de la evaluación y 2) Mejora de la competitividad de las plantas productivas con la aplicación del modelo.

El modelo de evaluación utiliza como herramienta dos cuestionarios estructurados bajo dos perspectivas, desarrollados en los cuestionarios de evaluación: el primero será el llamado cuestionario del “grado de implementación” (¿cómo de extensa es la aplicación de los métodos y herramientas propuestos?), mientras que el segundo, denominado “grado de madurez”, tratará la eficacia resultante de la aplicación de los métodos propuestos y la unirá a indicadores operativos de negocio (¿cómo de buena es la implementación?).

2. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN Y OBJETIVOS

La revisión bibliográfica confirma que, aún cuando algunos estudios han prestado atención a los roles de la planta dentro de una red de fabricación (Ferdows, 1989 y 1997; Vokurka y Davis, 2004), la clasificación propuesta por Ferdows (1989 y 1997) dispone de pocas evidencias empíricas más allá del estudio de caso (Vereecke y Van Dierdonck, 2002) y, por lo tanto, se podría enriquecer con aportaciones que desde la investigación empírica se puedan realizar (Vereecke y Van Dierdonck, 2002; Corti *et al.*, 2009). Asimismo, los estudios referidos al rol de planta en redes de operaciones multiplanta son prácticamente inexistentes (De Toni y Parusini, 2010).

Igualmente, parece clara la necesidad de extender la investigación para poder entender cómo coordinar las operaciones de plantas productivas pertenecientes a una red de fabricación (Shi y Gregory, 2005). La manera de lograr que el rendimiento de una red global sea mayor que

la suma de cada una de sus partes no es un aspecto bien entendido (Rudberg, 2004) en un contexto económico altamente dinámico y un entorno competitivo globalizado. Concretamente se necesitan modelos y métodos que ayuden en la práctica a evaluar, formular y desarrollar estrategias de operaciones (Slack y Lewis, 2002) cuando se afronten reestructuraciones de redes ya existentes (Vereecke y Van Dierdonck, 2002) con objeto de renovar las capacidades y competencias de las plantas (Teece *et al.*, 1997; Sweeney *et al.*, 2007).

Este artículo explora la aplicación empírica de la clasificación de *Ferdows* y extiende su aplicación al proponer un modelo de evaluación para lograr una mejora del rol estratégico de una planta dentro de una red global multiplanta.

3. MODELO PROPUESTO PARA EVALUAR/MEJORAR EL ROL DE PLANTA

Las condiciones dinámicas de los entornos en los que se integran las plantas productivas provocan la necesidad de desarrollar diferentes capacidades o competencias operacionales. El diseño de redes internacionales de fabricación, por tanto, debe integrar la evaluación de las capacidades o competencias (Sweeney *et al.*, 2007).

Si las competencias de una planta no son reforzadas para conseguir una mejora del rol estratégico, normalmente las plantas menos exitosas podrían desaparecer de la red, debido a la presión competitiva para reducir costes, y concentrar el volumen de producción en un número más reducido de plantas.

Por lo tanto, las compañías deben rediseñar y reconfigurar constantemente sus redes multiplanta. Cualquier iniciativa de rediseño citada puede efectuarse de manera global (red completa) o parcial (plantas de producción individuales), lo cual implicará un enfoque diferente en su planteamiento:

- Acercamiento *Top-down*: las compañías se ven obligadas a racionalizar y reestructurar su red multiplanta para adaptarse a condiciones cambiantes y desarrollar diversas capacidades operacionales: reforzando su ventaja competitiva para responder a las necesidades de sus clientes. El afrontar estos retos implicará decisiones que determinarán para la red qué competencias/capacidades se deben conservar, qué nuevas competencias/capacidades se quieren desarrollar y qué actividades es aconsejable externalizar.
- Acercamiento *Bottom-up*: las plantas son forzadas a desarrollar sus competencias para así elevar su rol estratégico y, por ende, no verse forzadas a desaparecer de la red global de operaciones de la compañía.

El modelo propuesto por los autores se compone de cinco pilares, los cuales están desplegados en métodos y herramientas (Figura 2). Los cinco principios del pensamiento *Lean* (producción ajustada) y su enfoque del flujo de valor (*Value Stream*) (Womack y Jones, 1996) han sido una base importante en la definición del modelo.

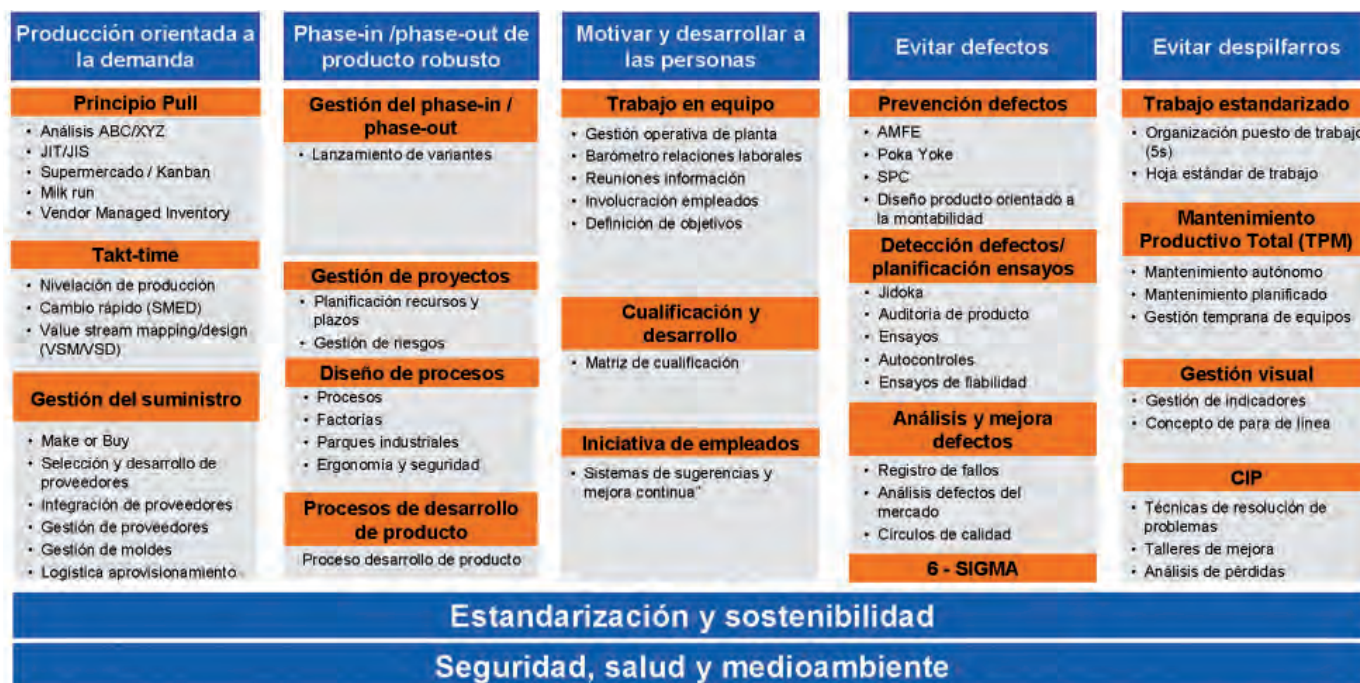


Figura 2: Esquema del modelo: pilares, métodos y herramientas

El modelo se divide en 5 pilares que cubren transversalmente y que se basan en los tres procesos principales de una empresa manufacturera propuestos por Womack y Jones (1996):

- Proceso “Pedido – Entrega”: cubierto por el 1er pilar.
- Proceso “Diseño de producto – lanzamiento en serie”: cubierto por el 2º pilar y 5º pilar.
- Proceso “físico de transformación”: cubierto por el 4º y 5º pilar.

El 3º pilar soporta los tres procesos principales y los demás procesos secundarios.

Los métodos y herramientas propuestas son el despliegue de cada pilar y persiguen apoyar el logro de la visión definida en cada pilar (Tabla 2); esta visión es semejante a la definición de “proceso perfecto” definido por los autores

dentro del pensamiento *Lean* (Ohno, 1988; Womack y Jones, 1996).

Los autores de este trabajo de investigación han centrado su modelo para cubrir la evaluación de indicadores de Coste (C), Calidad (Q), Velocidad (S), Flexibilidad (F), Innovación (I) y Fiabilidad (R) propuestos por Gobbo (2007) complementando con los de Motivación (M) y poder medir el rendimiento de una planta productiva, uniéndolo a la identificación del rol estratégico de planta actual.

Los indicadores citados están específicamente definidos en el cuestionario de evaluación, en las preguntas asignadas a pilares, herramientas y/o métodos:

El modelo ha sido creado considerando la capacidad de transferir cualquier sistema de gestión a otros países, a pesar de las diferencias culturales, dado que el desarrollo de la

	Producción orientada a la demanda	Phase-in/phase-out de producto robusto	Motivar y dinamizar a las personas	Evitar defectos (cero defectos)	Evitar despilfarros
<i>Visión</i>	<i>Flujo continuo</i>	<i>Cero desvíos frente al plan en nuevas introducciones</i>	<i>100% de los empleados motivados</i>	<i>Cero defectos</i>	<i>100% de valor añadido en los procesos</i>
COSTE (C)	X	X		X	X
CALIDAD (Q)				X	
VELOCIDAD (S)	X	X			
FLEXIBILIDAD (F)	X		X		
INNOVACIÓN (I)		X	X		X
FIABILIDAD (F)	X	X		X	X
MOTIVACIÓN (M)			X		X

Tabla 2: Indicadores incorporados en el cuestionario de evaluación

teoría de gestión se basa en lógica general (Harbison y Myers, 1989). Los sistemas de gestión específicos se relacionan a menudo con las prácticas excelentes y son aplicables en cualquier nación (Koontz 1969). Sin embargo, se necesita un acercamiento de contingencia (Beechler y Yang, 1994), donde una buena adecuación (estrategia, política y prácticas en el contexto) posibilitarán el alcanzar un buen rendimiento. Algunos autores afirman que los sistemas de gestión no son ni rechazados ni aceptados, sino que se crean hibridaciones junto a los sistemas de gestión locales (Kumon y Abo, 2004) y que este grado de hibridación viene determinado por circunstancias locales tales como, por ejemplo, cultura, actitud y ética de los trabajadores, educación y formación, sindicatos, prácticas de gestión locales, dificultades de comunicación, consideraciones económicas, industria y sector (Yokozawa *et al.*, 2007).

Si las circunstancias locales (Yokozawa *et al.*, 2007) y el sistema de gestión son tomadas en cuenta, la aplicación del modelo para la evaluación del rol estratégico de planta puede ayudar a identificar las áreas de mejora –basándose en los pilares, métodos y herramientas, y los indicadores asignados - que prioricen la consecución de un rol más atractivo para la planta. En consecuencia, se podrá lograr una mayor competitividad de planta y una mayor probabilidad de no ser afectada por reestructuraciones de la red.

3.1. DESARROLLO DEL INSTRUMENTO DE EVALUACIÓN

La evaluación se compone de dos cuestionarios: el “grado de implementación” (¿cómo de extensa es la implementación?) y el “grado de madurez”; tratará la eficiencia de la implementación y la unirá a indicadores operativos de negocio (¿cuán buena es la implementación?), los cuales se aplican atendiendo al tiempo de implementación del modelo (ver Figura 3).

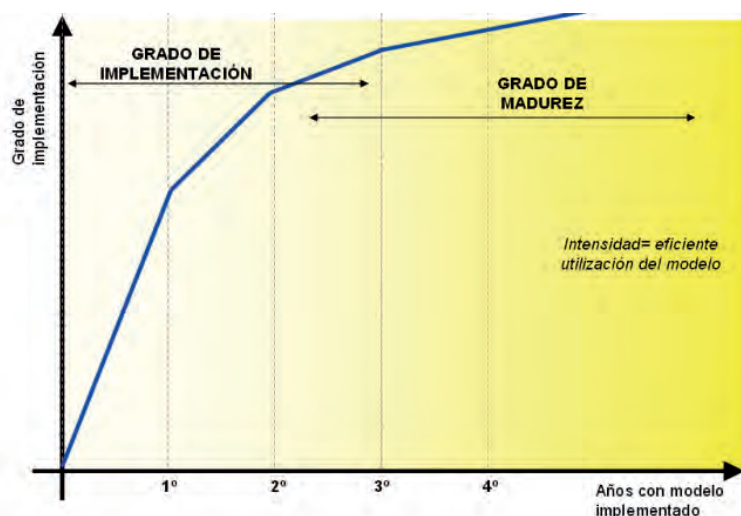


Figura 3: introducción del modelo y enfoque para su evaluación

El cuestionario de implementación tiene 400 preguntas referidas a cuántos y en qué grado de extensión han sido

implementados los métodos y herramientas previamente mencionados. El cuestionario del grado de madurez se compone de 150 preguntas. En ambos casos las preguntas se puntúan individualmente y la máxima puntuación es de 1000 puntos en total y 200 puntos por pilar.

Para el grado de implementación se utiliza el siguiente criterio (en función del alcance definido): 0 (no hay nada planificado ni implementado), 1 (planificado), 2 (área piloto), 3 (>50% del área de aplicación), 4 (totalmente implementado en todo el área de aplicación). Para el “grado de madurez” todas las preguntas tienen un indicador cuantitativo asociado (en la mayor parte de los casos utilizado habitualmente en la gestión diaria) que sirve de base para la puntuación.

Para una clasificación basada en la puntuación obtenida en el cuestionario del grado de madurez se sugiere la siguiente escala: <200 puntos – Plantas con bajo nivel de eficiencia en la implementación; 300 – 400 puntos situación actual de plantas avanzadas y con buena utilización del método; >400 puntos, excelente eficiencia en la utilización del modelo; >700 puntos visión de plantas ideal para 2015 según el modelo desarrollado.

4. ESTUDIO DE CASO: RECOPIACIÓN DE DATOS Y CHEQUEO DEL MODELO

El estudio de caso se desarrolla en una compañía multinacional de electrodomésticos dedicada al diseño, fabricación y distribución, que facturó más de 8.000 millones de Euros en 2009 y es una de las compañías líder del sector. La empresa posee más de 40 plantas en Europa, EEUU, Latinoamérica y Asia, con un número de trabajadores aproximado de 40.000. El modelo desarrollado ha sido implementado en la mayor parte de 34 plantas (7 países) desde comienzos de 2007, para lo cual se han creado departamentos centrales y en las divisiones de producto, y se ha nombrado a un coordinador en cada planta. Los departamentos centrales y de las divisiones de producto se han responsabilizado de comunicar y transferir las buenas prácticas existentes, así como el ofrecer formación, asesoría y consultoría práctica en las plantas. Los coordinadores en planta se han responsabilizado de dinamizar y empujar la implementación del modelo.

Una evaluación sistemática y estandarizada permite apoyar cualquier iniciativa de rediseño de redes productivas, tanto bajo el enfoque “Top-down” como el “Bottom-up”. Las áreas centrales pueden evaluar de manera detallada el rendimiento de una planta productiva y hacerlo comparable con otras en aspectos operativos; así mismo, las plantas pueden tomar la iniciativa en una eficiente implementación del modelo y con ello conseguir una mejor posición competitiva frente a otras plantas productivas.

Como resultado de las auditorías se emite un informe de fortalezas y debilidades de la planta, así como la evolución en cada uno de los métodos frente el año anterior. Este informe es acordado por el equipo auditor y la dirección de

cada planta; la ejecución de las acciones se considera dentro del plan anual de planta y es seguido por los coordinadores de las divisiones de producto.

4.1. RESULTADOS OBTENIDOS

Una primera fase de evaluación basada en el cuestionario del “grado de implementación” fue llevada a cabo en 2008 y 2009, mediante auditorías in situ realizadas por al menos 2 personas de los departamentos centrales y/o áreas de producto (las plantas que han comenzado la implementación del modelo en 2008 han sido primeramente evaluadas en el 2009). Uno de los autores ha estado presentes en más de 10 auditorías, tanto del grado de implementación como del grado de madurez, con objeto de asegurar la homogeneidad en los criterios de evaluación y comprobar el desarrollo in situ de las auditorías.

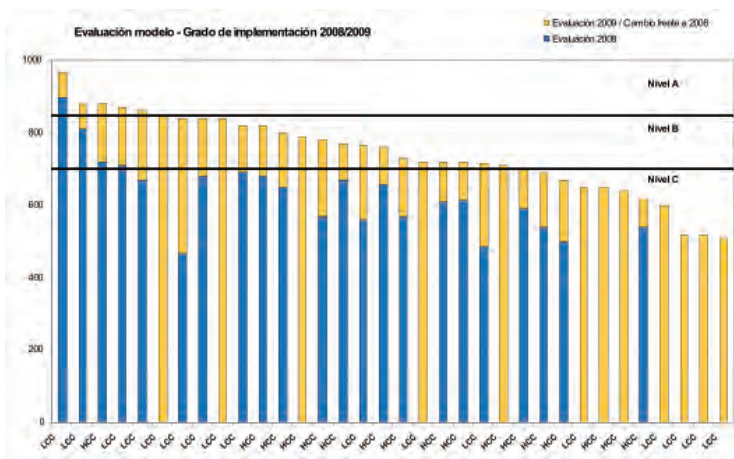


Figura 4: Evaluación de las plantas con el cuestionario y clasificación (2008-2009)

Tras los dos primeros años de implementación, se introdujo la evaluación adicional mediante el cuestionario del grado de madurez a todas aquellas plantas con una puntuación mayor que 700 puntos en el “grado de implementación” en 2009. Hasta el 31 de Octubre de 2010 se han realizado evaluaciones de grado de implementación en 27 plantas de las 34 totales, de las cuales únicamente 18 de las 24 plantas que obtuvieron más de 700 puntos en el grado de implementación del 2009

	A (>850 puntos)	B (700 - 850 puntos)	C (<700 puntos)	Total
2009	6	18	10	34
2010	4	16	7	27

Tabla 3: clasificación según auditoría del grado de implementación

Resultados 2009	Lead	Outpost	Source	Off-shore	Contributor	Server
A	-	-	1	2	3	-
B	6	1	2	3	4	2
C	2	-	3	1	3	1

Tabla 4: resumen de valoración según modelo y roles de planta (resultados 2009)

han sido evaluadas con el cuestionario del grado de madurez.

Basándose en el resultado final del cuestionario del grado de implementación se establece la siguiente clasificación de plantas (resultados 2009/2010):

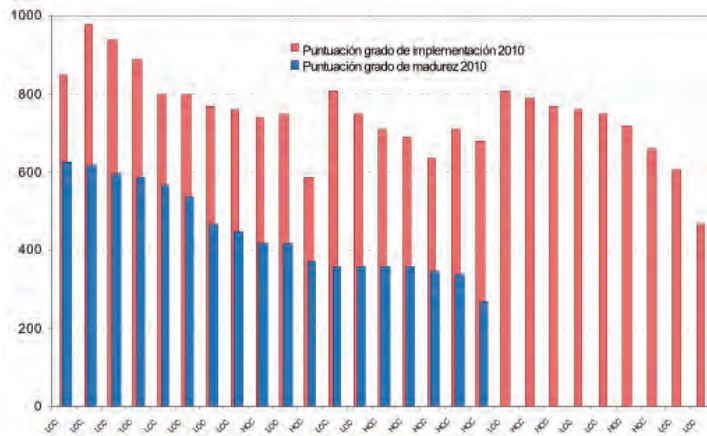


Figura 5: Evaluación de plantas con el cuestionario de madurez/implementación (2010)

Aún cuando faltarían 7 evaluaciones durante 2010, los resultados en el grado de implementación no varían significativamente (ninguna de las 7 fábricas a evaluar en 2010 obtuvo menos de 750 puntos en el 2009).

Resultado de la clasificación según el modelo desarrollado, así como bajo el modelo de Ferdows:

- La asignación inicial de un rol de planta ha sido discutido y determinado en los paneles Delphi (Linstone y Turoff, 1975) compuesto por equipo directivo de la planta, del área de producto y central así como las sedes centrales. Se han realizado mediante entrevistas personales, individuales y utilizando un cuestionario estructurado.
- La puntuación obtenida con los cuestionarios de evaluación se ha comparado con los roles asignados por el panel Delphi (ver Tabla 4 para un primer resumen). Estos resultados se han sometido a discusión en el panel delphi, con objeto reforzar la validez de los resultados.
- Las conclusiones y aportaciones al comparar la asignación de roles y los resultados de las herramientas de evaluación del modelo fueron trasladadas a los entrevistados para su revisión y aceptación. Las limitaciones encontradas se enumeran en el capítulo 5.

Referido al grado de implementación (comentarios cualitativos basados en resultados de 2009 y 2010. Para un resumen cuantitativo, ver Tabla 4):

- Ninguna planta “lead” está clasificada como A, el resto de plantas A fueron inicialmente establecidas en países de bajo coste (LCC) como plantas “offshore” y posteriormente “source”. Se observa que alguna de las plantas de mayor puntuación está empezando a mejorar su rol para convertirse en plantas “contributor”, habiendo mejorado sus resultados en ese tiempo. Dos de estas plantas pueden ser valoradas como plantas “lead” para ciertas competencias específicas (los métodos con mayor valoración).
- La mayoría de plantas catalogadas como B se encuentran localizadas en países de alto coste (mayoritariamente Europa occidental) e incluyen a todas las plantas “lead”. La evaluación de las plantas “lead” ha mejorado considerablemente de 2008 a 2009, pero todavía no ha llegado a ser excelente en 2010.
- Las plantas C son mayormente plantas “off-shore” o “source” recientemente establecidas. Algunas plantas C localizadas en países de alto coste son consideradas “contributor” o “lead”, a pesar de que se encuentren actualmente bajo severos programas de mejora de productividad y competitividad (áreas de trabajo basadas en los pilares del modelo con menor puntuación).

Referido al grado de madurez (evaluación 2010):

- Todas las plantas “lead” (a excepción de 2 con nivel inferior) se sitúan alrededor de los 400 puntos en el “grado de madurez”. Es decir, en un nivel medio más alto que la puntuación alcanzada con el “grado de implementación”.
- Las plantas con una puntuación más allá de los 500 puntos pertenecen a un mismo parque industrial localizado en un LCC, donde la aplicación del modelo ha sido una de las líneas estratégicas marcadas por la dirección de las plantas. Estas mismas plantas encabezan la evaluación basada en el grado de implementación.

Valoraciones externas del modelo:

- La planta con mayor puntuación en 2009 fue también galardonada con el premio japonés (JIPM) de excelencia en TPM.
- Las mejoras cuantitativas en materiales, costes laborales y gastos generales directamente vinculados con la implementación del esquema se cuantificaron alrededor de 3 puntos porcentuales del EBIT anual (Beneficios antes de intereses e impuestos: indicador que representa el margen o resultado operativo de explotación de la empresa antes de intereses e impuesto de sociedades. Es una medida de la rentabilidad de la empresa y sirve para la valoración de la misma) en el periodo 2007-2009.
- Otros beneficios indirectos han sido explícitamente reconocidos por parte del *panel Delphi* de directivos de diversos niveles de la empresa. Principalmente mejoras relacionadas con el tercer pilar del modelo (“Motivar y dinamizar a las personas”), así como la flexibilidad en

los procesos productivos o la estandarización resultante en ellos.

5. CONCLUSIONES Y LIMITACIONES

Las principales conclusiones relacionadas al propósito de este trabajo son:

- El modelo propuesto sirve como primera herramienta de análisis para evaluar el rol estratégico de una planta.
- La puntuación obtenida en el grado de madurez es más alta para las plantas productivas con roles más atractivos. En el cuestionario del grado de implementación no siempre se observa esta tendencia.
- La evaluación prioriza aspectos de mejora (pilares, métodos u herramientas con menores puntuación en las evaluaciones). Si dichas mejoras se despliegan, permiten mejorar el rol de planta.
- Se ha probado que la implantación del modelo ayuda a mejorar la eficiencia operacional de las plantas – más allá del país de aplicación.
- El cuestionario de evaluación basado en el grado de implementación (cuantos métodos/herramientas y en qué extensión) es útil en los 2 o 3 primeros años de aplicación del modelo. Tras ese período no se han percibido cambios significativos en las evaluaciones del grado de implementación, lo que sugiere que la extensión de aplicación del modelo viene marcado por el esfuerzo realizado en este primer período. Por ello, y tras ese tiempo, el enfoque de evaluación debe variar a la eficiente utilización del modelo (cuestionario del grado de madurez). Por ello es necesario asumir dos fases con objetivos diferenciados a la hora de aplicar el modelo: durante los primeros años se debe permitir una implementación del modelo. Tras ello la evaluación de la aplicación del modelo sí se debe enfocar a la eficiencia de la implantación.
- El grupo industrial en el que se ha desarrollado el estudio de caso ha fijado una auditoria anual para cada planta. En el 2011 se han centrado la evaluación basada en el cuestionario del grado de madurez. La aportación de una evaluación cuantitativa ha sido positivamente reconocida por la gerencia técnica de la multinacional.

Las limitaciones y líneas futuras de investigación identificadas para el modelo son:

- El modelo no considera explícitamente la contribución original de las plantas “lead”, las cuales obtienen valoraciones escasas en ciertas cuestiones y que pueden deberse a la falta de experiencia en ciertos aspectos dado el carácter pionero que deben adoptar estas plantas “lead”. El resto de plantas se benefician, por tanto, de las experiencias en las plantas “lead” y pueden reducir las curvas de aprendizaje.
- El modelo podría extenderse con ámbitos de la cadena de valor, los cuales también influyen en el rol

estratégico de planta y que principalmente suelen asumir inicialmente las plantas “lead”: por ejemplo, innovación en producto/proceso, gestión de la cartera de producto, gestión estratégica de proveedores, flexibilidad hacia diferentes regiones.

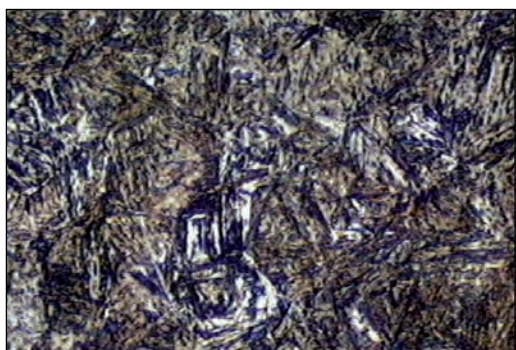
- En la red multiproducto estudiada existe una creciente centralización – más allá de las plantas- de funciones que dan servicio a la red, por ejemplo el desarrollo de nuevos productos, la gestión estratégica de compras, etc. El grado de influencia de cada plantas en las diferentes competencias y la interacción de esta centralización en los roles de las plantas podrían enriquecer el modo de evaluar dichos roles.
- El modelo se ha centrado en una red multiproducto dentro de una única compañía. Sería necesario extender la aplicación del modelo a otros sectores para poder valorar la bondad de su aplicación.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Beechler S, Yang J. "The transfer of Japanese-style management to American subsidiaries: Contingencies, constraints, and competencies". *Journal of International Business Studies*. 1994 Vol.25-3 p.467-491
- Corti D, Egaña MM, Errasti A. "Challenges for off-shored operations: findings from a comparative multi-case study analysis of Italian and Spanish companies". En: 16th annual EurOMA Conference, Gothenburg, 2009
- De Toni A, Parussini M. International Manufacturing Networks: a literature review. En: 17th Conference EurOMA, Porto, 2010
- Ernst D, Kim L. "Global production networks, knowledge diffusion and local capability formation". *Research Policy* 2002 Vol.31-8/9 p.1417-1429
- Ferdows K. "Mapping international factory networks, in K. Ferdows". *Managing International Manufacturing, Elsevier Science Publishers*. 1989 p.3-21
- Ferdows K. "Making the most of foreign factories". *Harvard Business Review*.1997 Vol.75 p.73-88
- Ferdows K. "Shaping Global Operations". *Georgetown University Journal of Globalization, Competitiveness & Governability*. 2009 Vol.9-1 p.136-148
- Gobbo J. Inter-firm network: a methodological approach for operations strategy. En: 14th EurOMA Conference, Ankara, 2007.
- Harbison F, Myers C. *Management in the industrial world: An international analysis*. New York: Mc Graw-Hill, 1959. 413p.
- Kumon H, Abo T. *The hybrid factory in Europe: The Japanese management and production system transferred*. London: Palgrave Macmillan, 2004. 312p. ISBN: 1-4039-1721-3
- Linstone H, Turoff M. *The Delphi Method: Techniques and Applications*. London: Addison-Wesley, 1975. 618p.
- Ohno T, *The Toyota Production System: Beyond large scale Production*. Portland: Productivity Press, 1988. 152p. ISBN: 978-09152299140
- Shi Y, Gregory M. "Emergence of global manufacturing virtual networks and establishment of new manufacturing infrastructure for faster innovation and firm growth". *Production Planning & Control*. 2005 Vol.16-6 p.621-631
- Slack N, Lewis M. *Operations Strategy. Upper Saddle River*. 2nd ed.: Prentice Hall, 2002. 496p. ISBN 0273637819
- Sweeney M., Cousens A., Szejczewski M., *International manufacturing networks design – A proposed methodology*. En: 14th EurOMA Conference, Ankara, 2007
- Teece D, Pisano G, Shuen A. "Dynamic capabilities and strategic management". *Strategic Management Journal*, 1997 Vol.7 p.509-533
- Vereecke A, Van Dierdonck R. "The Strategic Role of the Plant: Testing Ferdow's Model". *International Journal of Operations & Production Management*. 2002 Vol.22-5 p.492-514
- Vereecke A, Van Dierdonck R, De Meyer A. "A typology of plants in global manufacturing networks". *Management Science*. 2006 Vol.52-11 p.1737-1750
- Vereecke A. Vereecke A. *Network relations in multinational manufacturing companies*. Flanders DC and Vlerick Leuven Gent Management School, 2007
- Vokurka R, Davis R. "Manufacturing strategic facility types". *Industrial Management and Data Systems*. 2007 Vol.104-6 p.490-504
- Womack J, Jones D. *Lean Thinking*.2nd Edition. New York, Free Press, 1996. 396p. ISBN: 978-0743239270
- Yokozawa, K, De Bruijn E, Steenhuis H. *A conceptual model for the international transfer of the Japanese management systems*. En: 14th EurOMA Conference , Ankara, 2007

PRECIPITACIÓN DE MARTENSITA INDUCIDA POR DEFORMACIÓN.

Caracterización del contenido de martensita en aceros inoxidable austeníticos.



María Fernández-Ludeña

Ingeniero Industrial

UPM. ETSII. C/ José Gutiérrez Abascal, 2 - 28006 Madrid. Tfno: +34 91 3363060.
sfludena@hotmail.com

Recibido: 26/11/2010 • Aceptado: 09/05/2011

Strain-induced martensite precipitation. Martensite characterization in austenitic stainless steels

ABSTRACT

• Car manufacturers are looking for reducing emissions and hence cars weight. Austenitic stainless steels are one of the outstanding materials able to reduce weight of cars due to its combination of high strength and excellent formability. This paper describes the characterization of grades AISI-304, AISI-301 LN and AISI-316L by measuring the strain induced α -martensite content. Several techniques were compared in order to determine a correlation curve between ferritoscope measurement results and actual α -martensite contents. The studied methods involved X-ray diffraction, ferritoscope and quantitative optical metallography. The relationship between the ferritoscope results and actual α -martensite contents measured with the other techniques was found to be linear. The results of this study show that cold rolling is a suitable method to raise the material strength, while obtaining a sufficient formability.

• **Keywords:** austenitic stainless steels, martensite transformation, deformation, forming process.

RESUMEN

Los fabricantes de automóviles buscan reducir las emisiones y aligerar el vehículo. Los aceros inoxidable austeníticos son una buena opción, ya que combinan alta resistencia con excelente conformabilidad. En este artículo se describe la caracterización de los aceros inoxidable AISI-304, AISI-301LN y AISI-316L, midiendo la cantidad de martensita inducida por deformación. Para ello, se emplearon distintas técnicas (métodos metalográficos, difracción de rayos X y ferritoscopio) y se determinó la correlación entre los resultados experimentales y los teóricos, que resultó lineal.

Los resultados muestran que la laminación en frío es una técnica apropiada para aumentar la resistencia del material, aprovechando las particularidades de la transformación martensítica.

Palabras clave: Aceros inoxidable austeníticos, transformación martensítica, deformación, conformación.

1. INTRODUCCIÓN

La seguridad de los pasajeros y la protección del medioambiente son las principales preocupaciones de los fabricantes de automóviles hoy en día. Como consecuencia, la reducción de peso de los automóviles es cada vez más importante. Los aceros inoxidable austeníticos, que combinan perfectamente una alta resistencia con una excelente conformabilidad, podrían ser una buena opción y además se pueden obtener otros beneficios, aprovechando las particularidades de la transformación austenita-martensita inducida durante la transformación en frío de estos aceros.

Sin embargo, la suma de endurecimiento por deformación en frío y de precipitación de martensita de la austenita metaestable, aunque de gran interés para la obtención de vehículos de bajo peso y con gran capacidad de absorción de energía, incrementa los fenómenos de recuperación elástica dificultando los procesos de conformado por deformación.

Con este estudio se pretende cuantificar la cantidad de martensita que precipita durante la laminación en frío de los aceros inoxidable austeníticos tipo X5CrNi18-10, X2CrNi18-7 y X2CrNiMo17-12-2 con distintos grados de endurecimiento por deformación en frío, así como la correlación entre precipitación de martensita y la variación de las propiedades mecánicas.

2. TRANSFORMACIÓN MARTENSÍTICA EN ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS

Las buenas características mecánicas de estos aceros inoxidable pueden ser afectadas por la transformación martensítica inducida por deformación.

Los aceros inoxidable austeníticos metaestables tienen una estructura austenítica en estado de hipertemple, pero se transforman parcialmente a martensita durante la deformación. Esta transformación crea una estructura de material compuesto que supone un efecto de endurecimiento por esa deformación. La cantidad de martensita transformada dependerá de la composición química, la temperatura, la deformación aplicada y la velocidad con la que se aplica esta deformación.

La austenita en los aceros metaestables puede transformarse en dos tipos de martensita diferentes: una hexagonal compacta (martensita-e) y la otra de estructura cúbica centrada en el cuerpo (martensita-a'). **Bain** introdujo una teoría de cómo transforma la austenita en martensita a' o e, por un movimiento cooperativo de átomo. La transformación martensítica se cumple por la *distorsión de Bain*, deformación de cizalla en la interfase austenita-martensita que puede producirse por deslizamiento o maclaje.

Se ha estudiado que la martensita-a' nuclea en apilamiento de dislocaciones e intersecciones de bandas de deformación del tipo maclas y bandas de deslizamiento.

Las fases martensítica inducen cambios de volumen en comparación con la fase contigua austenítica. En el caso de la martensita-a' se genera una expansión en volumen que oscila entre el 1-4% y la martensita-e genera una contracción en volumen. Siguiendo los estudios de **Meter Hedström**, la martensita-a' es la mayor fase transformada en los austeníticos metaestables, alcanzando valores hasta del 45% en volumen a altas deformaciones plásticas; la presencia de martensita-e es mucho menor, aproximadamente del 5%.

La temperatura es un factor importante en la transformación inducida por deformación. Estas transformaciones afectan a las curvas tensión-deformación de los distintos aceros. Con un aumento de la temperatura y una disminución de la formación de martensita en la deformación, las curvas cambian de forma a una temperatura de 22°C (temperatura ambiente). A bajas temperaturas, las curvas tensión-deformación son características de una transformación excesiva de martensita.

3. TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE LA CANTIDAD DE MARTENSITA

Para medir el contenido de martensita formada después de la deformación, se han empleado tres técnicas distintas: metalografía, difracción de rayos X e inducción magnética (ferritoscopio). Las dos primeras requieren preparación de muestras (corte, esmerilado, pulido, etc.) y ensayos previos que enmascaran el contenido real de martensita, mientras que las medidas por inducción magnética se pueden tomar *in-situ*, directamente sobre el material.

El único inconveniente que presenta el ferritoscopio es que debe calibrarse con otro método de medida, ya que mide directamente el contenido de ferrita-d; sin embargo, es fácil obtener la correlación entre este valor y el contenido de martensita.

Comparando las medidas obtenidas con los tres métodos, se confirma que el valor medido con el ferritoscopio es proporcional al contenido de martensita, es el más fiable y el que menos preparación requiere. Además, al poder tomar medidas directamente con el ferritoscopio, se tienen todos los valores de contenido de martensita en los distintos estados de tensión y deformación.

4. MÉTODO EXPERIMENTAL

La investigación se realizó con los aceros inoxidable tipo AISI-304 (X5CrNi18-10), AISI-301LN (X2CrNi18-7) y AISI-316L (X2CrNiMo17-12-2), según normas AISI y UNE-EN-10028-7:2000 respectivamente, tanto en estado de hipertemple como con diferentes grados de laminación en frío.

El acero tipo X5CrNi18-10 fue laminado en frío en un pequeño laminador a escala de laboratorio obteniendo diferentes grados de reducción de espesor: 5%, 12%, 15%, 30%, 50% y 70%. En el caso del acero X2CrNi18-7 los grados de reducción fueron del 7% y 10%, mientras que el acero X2CrNiMo17-12-2 fue siempre ensayado sin reducción. En todos los casos se partió de chapas de dimensiones 100x250 mm obtenidas de bobinas comerciales de espesor 1'5 mm, siendo la dimensión mayor la de la dirección de laminación.

El contenido de martensita-a' se determinó mediante metalografía, difracción de rayos X y ferritoscopio.

4.1. METALOGRAFÍA

Todas las probetas se pulieron electrolíticamente con el equipo *Struers Lectropol-5*. Se atacaron electrolíticamente con ácido oxálico al 10% para mostrar el borde de grano de la austenita. Para colorear la fase martensita-a' se utilizó el fluido férrico EMG807 (*Ferrofluidics Corp.*).

4.2. DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Las medidas se determinaron con un equipo *Stresstech Xstress 3000*. La intensidad de los rayos X difractados se

utilizó para calcular el contenido de martensita. Para que las medidas no se vieran afectadas por la textura e inclinación del haz, se eliminó la capa superficial mediante electropulido.

4.3. FERRITOSCOPIO

La permeabilidad magnética, μ_p , de la probeta se midió mediante el ferritoscopio MP30, fabricado por *Helmut Fischer GMBH*. Hay una correlación directa entre la permeabilidad relativa μ_r y la cantidad de ferrita y martensita contenida en la probeta. Sin embargo, la red tetragonal de la martensita- α' , de alta distorsión reticular y gran densidad de dislocación, tiene diferente μ_r que la ferrita- α' . Las lecturas del ferritoscopio son siempre más bajas que el contenido real de martensita- α' , y por ello es necesaria una calibración.

Para obtener el contenido de martensita- α' , C_a , como función de la respuesta magnética del ferritoscopio (mr) sin el efecto de la martensita superficial, la nueva curva de calibración se puede escribir para una respuesta magnética $mr > 1\%$ como:

$$C_a = 100 \left[0,17 + 0,11(mr + 15) - \left(\frac{4}{mr + 15} \right) - \left(\frac{8}{(mr + 15)^2} \right) - \left(\frac{4000}{(mr + 15)^3} \right) \right]$$

Se validó esta ecuación para todos los estados de deformación.

En el siguiente gráfico (Fig. 1), se observan las medidas del contenido de martensita- α' determinadas por difracción de rayos X, previo electropulido de la superficie, vs el contenido de martensita- α' medido por el ferritoscopio, así como los porcentajes de martensita- α' existentes en las microfotografías obtenidas por deposición de fluido férrico.

Se comparan, en el mismo gráfico, con las curvas obtenidas por **Hecker** y **Peterson** en ensayos de tracción a bajas temperaturas (para obtener volumen alto de martensita) y la obtenida por **Hünicke** a temperatura ambiente. Todos los puntos coinciden prácticamente en la nueva curva de calibración, independientemente del estado de deformación.

El tamaño de grano de los aceros inoxidables estudiados está en el intervalo 16-19 μm , lo que corresponde al tamaño de grano ASTM N° 8 a 9. El acero X5CrNi18-10 tiene una estructura de grano equiaxial uniforme, sin martensita- α' . Aumentando el grado de laminación en frío, la estructura de grano se va alargando y se forma martensita- α' .

La Figura 2 muestra la microestructura y el contenido de martensita- α' de los aceros hipertemplados X2CrNiMo17-12-2 y X2CrNi18-7, y de los aceros laminados en frío X2CrNi18-7/7% y X5CrNi18-10/5%.

El acero X2CrNiMo17-12-2 no muestra martensita- α' en la microfotografía; sin embargo, las medidas del ferritoscopio evidencian una fase magnética, como consecuencia de la pequeña cantidad de ferrita- δ formada en el proceso de fabricación del acero.

El acero X2CrNi18-7 tiene, como el X5CrNi18-10, una estructura de grano equiaxial uniforme con algo de martensita- α' . Cuando se lamina en frío un 7%, la estructura de grano se alarga y se forma martensita- α' .

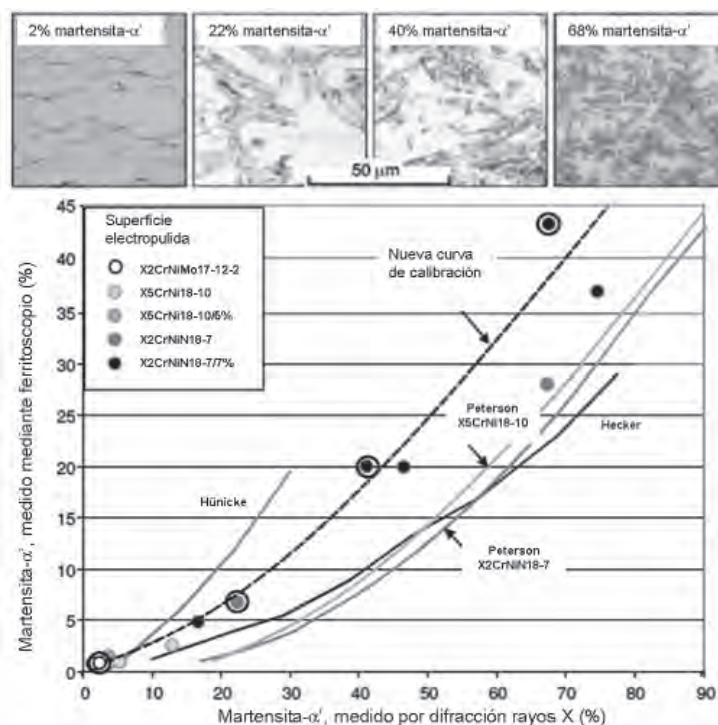


Fig. 1: Nueva curva de calibración sin el efecto de la martensita superficial

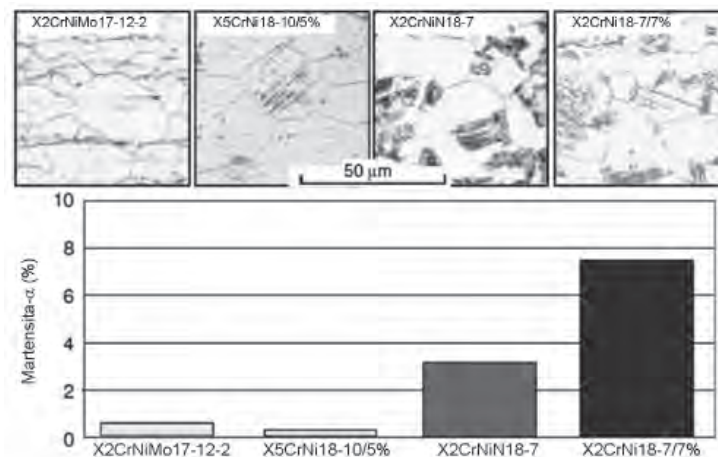


Fig. 2: Microestructura y contenido de martensita- α' de los aceros hipertemplados X2CrNiMo17-12-2 y X2CrNi18-7 y de los aceros laminados en frío X2CrNi18-7/7% y X5CrNi18-10/5%.

Los resultados por difracción de rayos X y mediante ferritoscopio son acordes a la microestructura del material. Cerca del 8% de martensita se forma en el material laminado en frío.

5. ENSAYO DE TRACCIÓN

El análisis de la deformación fue estudiado por los sistemas de *Argus* y *Aramis* de la compañía *Gom*. Las

propiedades mecánicas se determinaron en un ensayo de tracción con probetas cortadas según la norma EN 10002, a 0°, 45° y 90° de la dirección de laminación. Los ensayos cuasiestáticos se realizaron a temperatura ambiente. El proceso de laminación en frío conlleva un incremento del límite elástico y de la resistencia a la tracción, mientras que la ductilidad se reduce.

Los resultados de las medidas de martensita- α' están en consonancia con las microfotografías; cerca de la rotura los granos se deforman fuertemente. Con un aumento de la distancia conforme a la rotura, el grano se alarga menos.

En la Figura 3 se comparan las curvas tensión-deformación para los distintos aceros ensayados. Una baja resistencia y una ductilidad intermedia presenta el acero X2CrNiMo17-12-2. El acero X5CrNi18-10 tiene valores más altos con una deformación menor laminado en frío. Al acero X2CrNi18-7, con un 7% de laminación, la deformación en frío implica un aumento de la resistencia pero un descenso en la ductilidad. Una vez más, la laminación en frío provoca un aumento en la resistencia, pero disminuyendo la ductilidad.

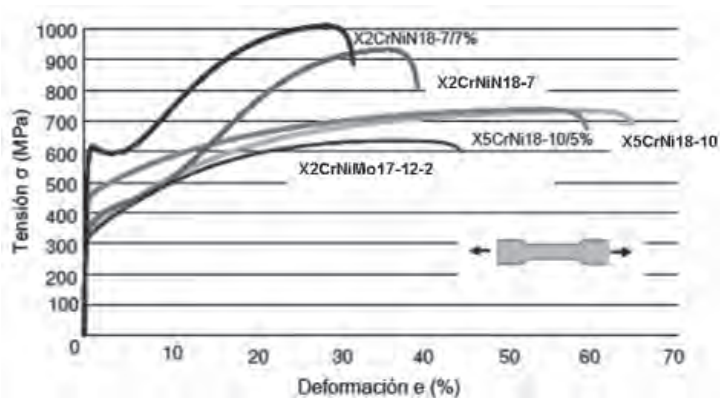


Fig. 3: Comparación entre las curvas tensión-deformación del acero X2CrNiMo17-12-2 con los aceros X5CrNi18-10 y X2CrNi18-7

En la Figura 4 aparecen los correspondientes valores del coeficiente n , como función de la deformación real, para los aceros X5CrNi18-10, X5CrNi18-10 (def. 5%), X2CrNi18-7 y X2CrNi18-7 (def. 7%) y la curva de fluencia para el acero X2CrNi18-7 (def. 7%). Para todos los aceros, el valor n cambia en función de la deformación real ϵ . El valor n de los aceros X5CrNi18-10 y X5CrNi18-10 (def. 5%) aumenta continuamente hasta el inicio del cuello. El valor n para el acero X5CrNi18-10 se mantiene prácticamente constante para $\epsilon > 0.1$ y siempre por encima de los valores n del acero laminado en frío X5CrNi18-10 (def. 5%). Por otra parte, el valor n del acero X2CrNi18-7 aumenta rápidamente y alcanza un valor máximo. Después el valor n disminuye, y en el inicio del cuello a ϵ_g la pendiente cae rápidamente. Una forma similar de la curva se obtiene para el acero X2CrNi18-7 (def. 7%), pero el valor máximo

de n de 0.56 es mucho más bajo para el acero hipertemplado X2CrNi18-7. El coeficiente n de endurecimiento por deformación tiene un nivel constante para $\epsilon > 0.1$ sólo para el acero estable X2CrNiMo17-12-2. En consecuencia, el valor n para el acero X2CrNiMo17-12-2 se puede calcular según EN 10130.

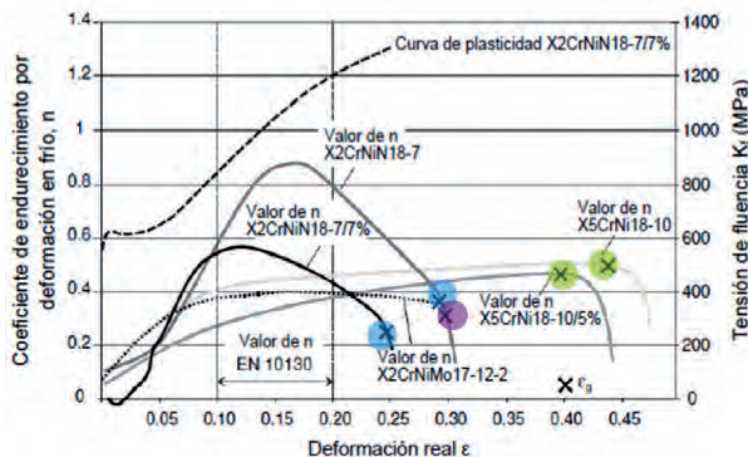


Fig. 4: Valores del coeficiente n , como función de la deformación real, para los aceros X5CrNi18-10, X5CrNi18-10/5%, X2CrNi18-7 y X2CrNi18-7/7%, y curva de fluencia para el acero X2CrNi18-7/7%.

6. RESULTADOS OBTENIDOS

La interacción entre plasticidad y transición de fases en la deformación de los aceros inoxidables austeníticos metaestables se traduce en la obtención de martensita y el aumento de la resistencia mecánica por encima de 2 GPa. La composición química del acero, la cantidad de deformación plástica y la temperatura de conformación son los parámetros que controlan la fracción volumétrica de martensita inducida por deformación en los aceros austeníticos.

Los resultados obtenidos mediante ferritoscopio y por difracción de rayos X en las distintas muestras presentaron una buena correlación con las curvas publicadas por Hecker y Peterson.

El límite elástico del material X5CrNi18-10 se aumentó mediante laminación en frío debido al fenómeno de endurecimiento por deformación y a la formación de martensita- α' . Sin embargo, ésta fue relativamente baja, sólo el 9% de martensita- α' se formó después del 15% de laminación en frío. Aparentemente, las fuerzas de compresión durante la laminación en frío ralentizaron la formación de martensita- α' , ya que la transformación austenita \rightarrow martensita- α' conduce a un aumento de volumen.

El acero estable X2CrNiMo17-12-2, al no tener martensita precipitada, presentaba un bajo endurecimiento por deformación y una baja resistencia a la tracción. En el acero metaestable X2CrNi18-7 la formación de martensita

inducida por deformación aumentaba la velocidad de endurecimiento, especialmente nada más comenzar la formación de martensita- α' .

Esto condujo a niveles más altos de resistencia a la tracción que los obtenidos con los aceros más estables X2CrNiMo17-12-2 y X5CrNi18-10. Para el acero X2CrNi18-7 laminado en frío, el límite elástico tenía lugar a una deformación real ϵ baja.

La formación de martensita influyó fuertemente en la ductilidad obtenida. En el acero metaestable X2CrNi18-7 se alcanzó un bajo alargamiento a la rotura inducido por la rápida formación de martensita.

7. CONCLUSIONES

El conocimiento de la cantidad de martensita precipitada por deformación en frío en los aceros inoxidables austeníticos metaestables es fundamental para los eventuales procesos de conformado de chapas de carrocerías de automóvil.

El hecho de que la precipitación de martensita dependa, entre otros factores, de la cantidad y velocidad de deformación, complica el estudio de los fenómenos de recuperación elástica en los aceros inoxidables con respecto al de otros materiales comúnmente empleados en la fabricación de partes del automóvil.

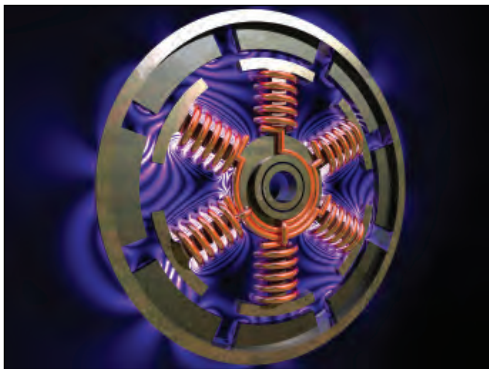
martensitic transformation of metaestable austenitic steel". *Acta Materialia*. 2004. Vol. 52 N° 17, p. 5203-5214.

- Hecker S, Stout MG, Staudhammer KP. "Effects of strain state and strain rate on deformation-induced transformation in 304 stainless steel. Part I: Magnetic measurements and mechanical behaviour". *Metallurgical Transactions*. 1982. Vol. 13A, p. 619-626.
- Nagy E, Mertinger V, Tranta F et al. "Deformation of induced martensitic transformation in stainless steel". *Materials Science and Engineering*. 2004. Vol. 378 N° 1-2, p. 308-313.
- Peterson SF, Mataya MC, Matlock DK. "The formability of austenitic stainless steel". *JOM*. 1997. Vol. 49 N° 9, p. 54-58.
- Talonen J, Aspegren P. "Comparison of different methods for measuring strain induced martensite content in austenitic stainless steels". *Materials Science and Technology*. 2004. Vol. 20 N°12, p. 1506-1512.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Beese A. *Quantification of phase transformation in stainless steel 301 LN sheets*. MIT. 2008.
- Cantor B, Grant P, Johnston C. *Automotive engineering: lightweight, functional and novel materials*. Taylor & Francis. 2008. ISBN 978-0-7503-1001-7.
- De Ka, Murdock DC, Mataya MC. "Quantitative measurement of deformation-induced martensite in 304 stainless steel by X-ray diffraction". *Scripta Materialia*. 2004. Vol. 50 N° 12, p. 1445-1449.
- Ferreira H, Lima P, Oliveira P. "Deformation induced martensite in an AISI 301LN stainless steel: characterization and influence on pitting corrosion resistance". *Materials Research*. 2007. Vol. 10, N° 4, p. 359-366.
- Garion C, Skoczen B, Sgobba S. "Constitutive modelling and identification of parameters of the plastic strain-induced martensitic transformation in 316L stainless steel at cryogenic temperatures". *International Journal of Plasticity*. 2006. Vol. 22 N° 7, p. 1234-1264.
- Han HN, Gil Lee C, Sung-Joon K. "A model for deformations behaviour and mechanically induced

Diseño de un banco de ensayo automatizado para motores Brushless



Alfonso Bachiller-Soler*
Francisco De Paula García-López*
Ramón Cano-González*

Dr. Ingeniero Industrial
Ingeniero Técnico Industrial
Ingeniero en Automática y Electrónica Industrial

* Universidad de Sevilla. EPS. Dpto. Ingeniería Eléctrica. C/Virgen de África, 7 - 41011 Sevilla. Tfno: +34 954 552831. abslhm@us.es, fragarlop@hotmail.com, ramoncano@us.es

Recibido: 30/11/2010 • Aceptado: 11/01/2011

Design of an automated test bench for brushless motors

ABSTRACT

- Because of the many advantages shown by the brushless DC motors, or brushless motors, there is currently a significant increase both in their development and also in their utilization in the industrial sectors such as the automobile, aerospace, and medical, as well as in automation and instrumentation equipment. This requires making a series of tests to establish a comparison of performance between machines from different manufacturers or with different innovations. This article describes the implementation of a test bench that allows full automation testing.
- **Keywords:** Brushless motor, test bench, PLC (programmable logic control).

RESUMEN

Debido a las numerosas ventajas que presentan los motores de corriente continua sin escobillas, o motores *brushless*, en la actualidad se está produciendo un aumento importante en su desarrollo y empleo en los sectores industriales del automóvil, aeroespacial, sanitario, así como en equipos de automatización e instrumentación. Esto obliga a la realización de una serie de ensayos para poder establecer una comparativa de prestaciones entre máquinas de distintos fabricantes o con diferentes innovaciones. En este artículo se describe la implementación de un banco de ensayos que permite realizar el ensayo de forma totalmente automatizada.

Palabras clave: Motor brushless, banco de ensayo, PLC.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se está produciendo un crecimiento en el empleo de los motores *brushless* en la industria en decremento de los motores clásicos de corriente continua. Esto se debe fundamentalmente al alto coste de mantenimiento que requieren estos últimos.

A nivel constitutivo, un motor *brushless* es básicamente un motor síncrono trifásico con rotor de imanes permanentes, aunque su principio de funcionamiento se asemeja más al de un motor de corriente continua [1]. En su funcionamiento como motor, el giro del rotor de la máquina se debe a la reacción del campo magnético giratorio creado por el devanado estatórico y el correspondiente a los imanes permanentes alojados en el rotor. Para generar dicho campo magnético giratorio, las bobinas estatóricas se deben alimentar mediante un sistema de tensiones apropiado obtenido a partir de un convertidor electrónico que, a su vez, se alimenta de una fuente de corriente continua [2], [3].

Según se ha comentado, el funcionamiento de los motores brushless es muy similar a los motores de corriente continua en los que los campos magnéticos generados por los devanados inductor e inducido se encuentran en cuadratura. Esto da lugar a un par constante en el eje. Para conseguir estas mismas condiciones en un motor *brushless*, es necesario un sistema de control apropiado que produzca una alimentación secuencial de cada una de las fases del estator de forma sincronizada con el movimiento del rotor. A diferencia del motor de corriente continua, el motor

brushless necesita disponer de los elementos apropiados que detecten la posición del rotor en todo instante, lo cual se hace generalmente mediante sensores de efecto Hall.

Las ventajas más importantes de los motores *brushless* frente a los motores clásicos de corriente continua son la supresión de las escobillas y el colector de delgas. Esto se traduce en un menor tamaño, mayor rendimiento, mayor vida útil y menor mantenimiento [1]. Además, la eliminación del colector reduce la inercia, reduce la distancia entre cojinetes y elimina las limitaciones de velocidad impuestas por éste. La principal desventaja respecto a los motores de corriente continua convencionales es que requieren de un control más complejo.

Para evaluar las prestaciones de este tipo de motores se recurre a curvas características similares a las de un motor de corriente continua clásico [4] en las que se relacionan las magnitudes más importantes de la máquina como son el par mecánico en el eje, la velocidad de giro, la intensidad, la potencia absorbida y el rendimiento. Así, se obtiene la curva característica de velocidad en la que se relaciona la velocidad de giro con la intensidad que absorbe el motor, la curva característica de par en la que se relaciona el par con la intensidad que absorbe el motor y la curva característica mecánica que relaciona el par con la velocidad de giro.

Además de estas curvas características, es interesante obtener otras que tienen en cuenta las condiciones energéticas del motor y que tienen mucha importancia a la hora de cumplir una serie de especificaciones de trabajo. Estas curvas relacionan el rendimiento y la potencia útil con la velocidad de giro del motor.

Un banco de ensayo es una plataforma que permite someter, en este caso particular, a un motor a distintos regímenes de funcionamiento y medir todas y cada una de las magnitudes anteriormente citadas como el par mecánico en el eje, la velocidad de giro y una serie de magnitudes eléctricas.

En este contexto surge la necesidad de modernizar un banco de ensayo existente cuyo funcionamiento era esencialmente manual. Un operario era el encargado de variar las condiciones de carga y de anotar las correspondientes medidas, lo cual suponía por un lado una gran inversión de tiempo así como los correspondientes errores en las medidas tomadas. Así mismo, esto también daba lugar a un calentamiento de la máquina durante el ensayo motivado por la inevitable duración de este.

El objetivo principal de este artículo es la descripción de un banco de ensayos totalmente automatizado, sin apenas la intervención del operador, de forma que permita reducir el tiempo de los ensayos y que disminuya los errores en las medidas. Este desarrollo se ha llevado a cabo en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Sevilla y es válido para cualquier tipo de motor *brushless*.

2. DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE ENSAYO

En general, el desarrollo de cualquier sistema automatizado y en particular el banco de ensayo descrito en este artículo, requiere de un conjunto de sensores para la recogida de información, un sistema de procesado de la información y unos actuadores [5].

En este apartado se hará una descripción del banco de ensayo desarrollado, indicando y describiendo cada una de las partes constituyentes. A modo de diagrama de bloques, en la Figura 1 se ha representado de forma simplificada los elementos más importantes del banco así como la interconexión a nivel de señal y a nivel eléctrico entre ellos.

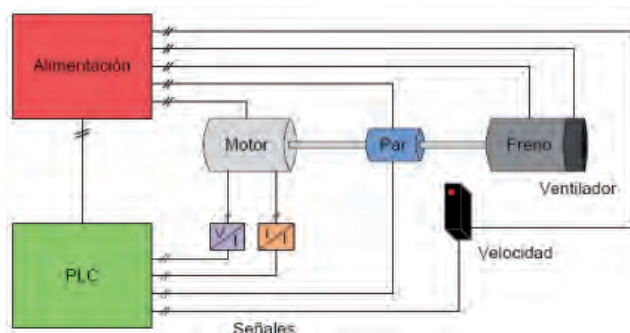


Figura 1: Diagrama de bloques del banco de ensayo

Constructivamente, el banco de ensayos consta de dos partes bien diferenciadas. La primera parte consiste en una bancada (Figura 2) donde se encuentran dispuestos los siguientes elementos: motor *brushless* a ensayar, freno, sensor de par, sensor de velocidad así como otros elementos auxiliares como acopladores de ejes.

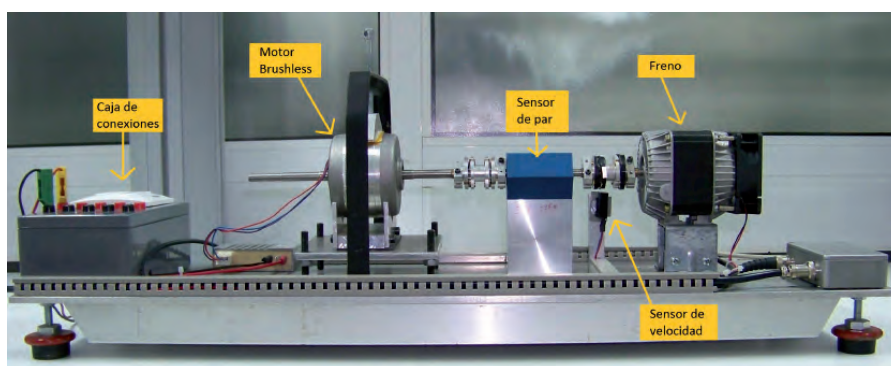


Figura 2: 1ª Parte del banco

La segunda parte (Figuras 3 y 4) consiste en un contenedor de chapa metálica fabricada a tal efecto que aloja a los equipos de adquisición y control del banco. En la parte frontal se encuentra dispuesto, sobre carril DIN, el PLC

(*Programmable Logic Control*) con el cual se realizan todas las operaciones lógicas, así como los distintos terminales de conexión de señales y de alimentación eléctrica. En la parte posterior se encuentran alojadas las fuentes de alimentación de los distintos elementos del equipo, los traductores de tensión e intensidad para las medidas eléctricas, relés para la activación y secuencia de las maniobras, así como los correspondientes elementos de soporte y conexión.



Figura 3: 2ª Parte del banco. Vista frontal

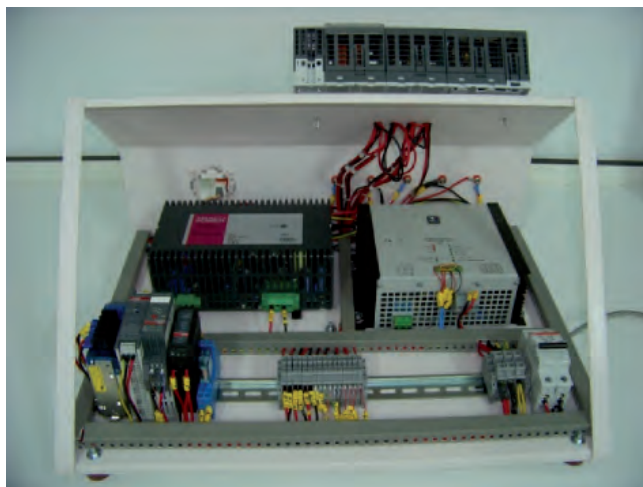


Figura 4: 2ª Parte del banco. Vista trasera

A continuación se describen los elementos más importantes del banco:

- El sensor de par es un elemento de gran importancia en el ensayo debido a que mide la variable que será referencia en la mayoría de las curvas características resultantes. En este caso se ha utilizado un sensor cuya señal digital es transmitida sin contacto desde el eje a la carcasa. En cuanto a sus características técnicas hay que destacar que tiene un rango de medida de 1Nm y una clase de precisión de 0.25 [8]. Esto quiere decir que el error relativo máximo respecto al fondo de escala (1Nm en este caso)

es inferior al 0.25 %, que en valores absolutos se traduce en un error absoluto máximo de 0.0025 Nm para cualquier medida dentro del rango de 1Nm. Este sensor proporciona una señal de tensión en el rango $\pm 5V$ proporcional al par en el eje. Esta señal se conecta a una de las entradas analógicas del PLC.

- Aunque existen diversos métodos para la medida de velocidad, en este caso se ha optado por un sensor fotoeléctrico debido a su buena relación entre economía y precisión frente a otros, como los encoders, que, además de su elevado coste, requieren un acoplamiento mecánico al eje. Con este tipo de sensor y la disposición de una serie de elementos fotorreflexivos en el acoplamiento de ejes se genera un tren de pulsos proporcional a la velocidad del eje. Una de las entradas del PLC configurada como contador rápido es la encargada de traducir la frecuencia de los pulsos a la velocidad en rpm del eje. La precisión alcanzada con este método es del 0.5% a la velocidad máxima de 5000 rpm.
- El freno es el encargado de ofrecer un par resistente variable. En el mercado hay varios tipos de frenos aplicables en este caso, si bien es verdad que los más adecuados son los frenos electromagnéticos por su facilidad de control mediante señales eléctricas. En este caso particular, a nivel de prototipo se ha utilizado un motor monofásico de inducción modificado en el laboratorio para que pueda ser alimentado por corriente continua sin sufrir daños. Es importante destacar que los condicionantes técnicos que debe cumplir el freno es que sea capaz de proporcionar un par resistente en el eje adecuado con las características del motor a ensayar y que soporte el correspondiente aumento de temperatura sin dañarse. En la fabricación del banco a nivel industrial, será conveniente incorporar un freno electromagnético sin que esto provoque cambio alguno en la operatividad del banco. Hay que destacar que, en este caso particular, para evitar un excesivo calentamiento durante el ensayo, se ha acoplado un ventilador capaz de disipar el calor generado.

- Se han instalado una serie de fuentes de alimentación para los diferentes rangos de tensión requeridos: 0-65V, 24V y 15V. De entre todas estas fuentes destacan dos por su importancia. Por una parte, la encargada de alimentar al motor a ensayar es una fuente de 24V, 6A cuya tensión está autorregulada para compensar la caída de tensión, manteniendo de esta forma la tensión en bornes de la máquina. Por otra parte, la fuente que alimenta al freno es

una fuente regulable de 0-65V, 10A. El valor de la tensión de ambas fuentes se controla externamente mediante una salida analógica del PLC. El ventilador, el sensor de velocidad y el PLC se encuentran alimentados por una fuente de tensión fija de 24V. Por último, la fuente de 15V es la que suministra la alimentación al sensor de par. La potencia máxima del banco viene limitada por el freno, que puede llegar hasta los 500W.

AC500, con una serie de módulos de expansión para adaptarlo a las exigencias del proceso, tales como la entrada y salida de señales analógicas y digitales.

En la Figura 5 se puede ver el banco de ensayos completo.

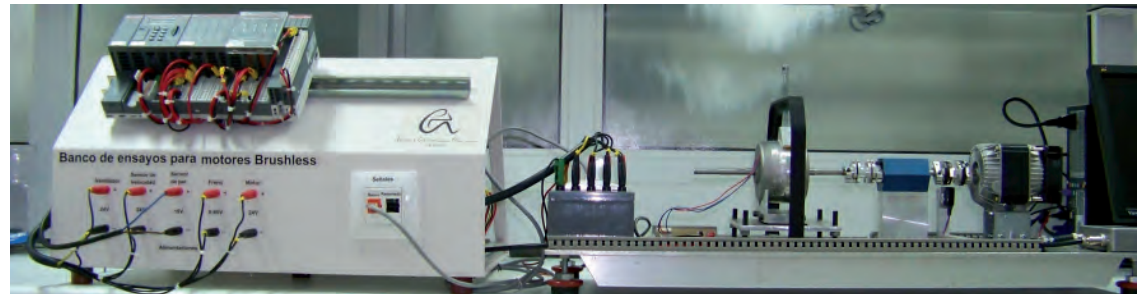


Figura 5: Banco de ensayos completo

- Los transductores de tensión e intensidad son necesarios para adaptar las distintas señales a los niveles adecuados de forma que puedan ser tratadas por el PLC. Concretamente, se han utilizado sendos transductores para convertir los valores de la tensión e intensidad del motor brushless al estándar de medida 4-20 mA.
- El PLC es un elemento fundamental en el proceso de ensayo debido a que es el responsable de toda la secuenciación del mismo. En este caso se ha optado por un autómata de la marca ABB de la serie

3. INTERFAZ GRÁFICA

Para facilitar la operación del banco, además del PLC, se ha diseñado un sistema SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos) a partir del cual el usuario puede controlar y visualizar el estado del ensayo. Para ello se ha utilizado el software CoDeSys (Controller Development System o Sistema de desarrollo del controlador) [6]. Este software facilita por un lado la programación del PLC mediante distintos lenguajes como por ejemplo texto estructurado (ST), lenguaje de contactos (LD), lenguaje de bloques (FBD), etc., y por otro lado permite la creación de entornos gráficos.

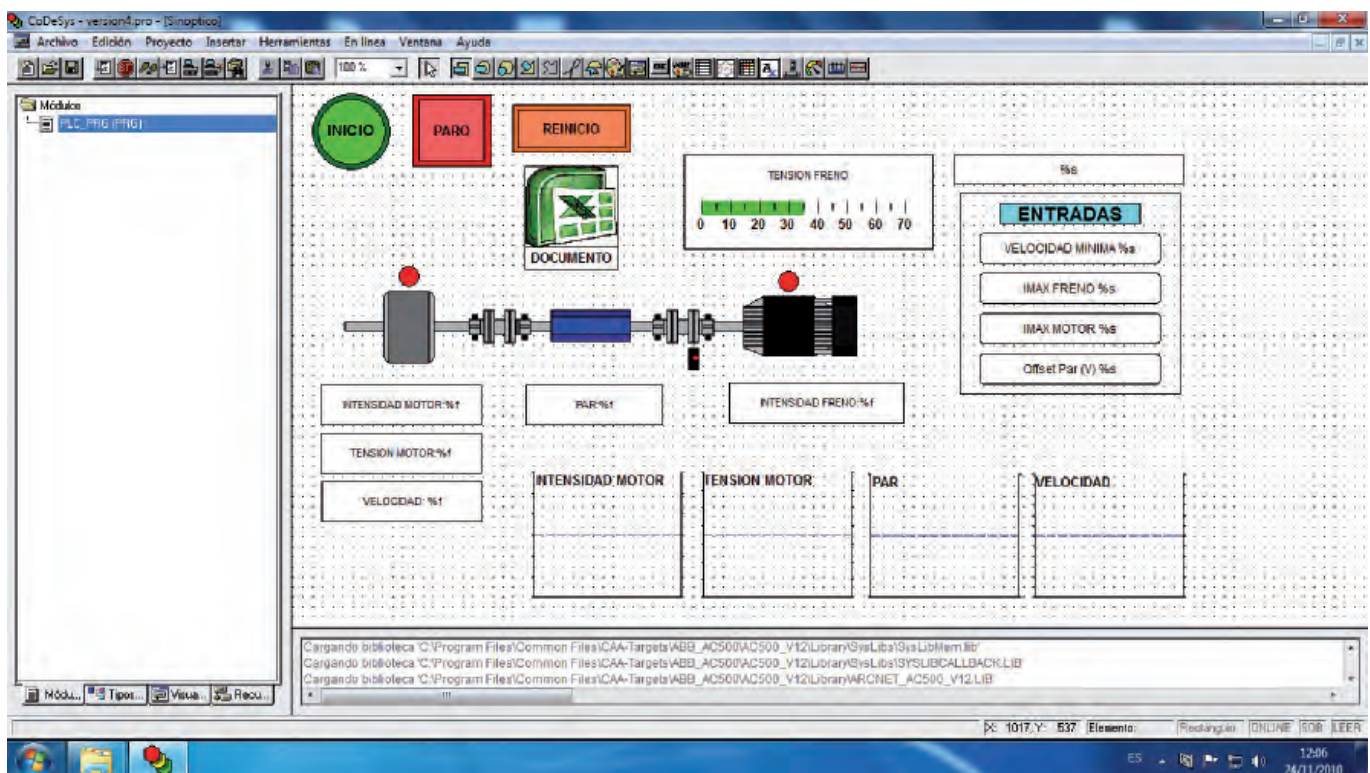


Figura 6: Interfaz de usuario del banco de ensayo

En este caso particular, toda la programación del PLC e interfaz de usuario se ha basado en redes de Petri [7] que posibilita la estructura secuencial del ensayo, dando lugar a unos estados que definen el proceso y los cuales habilitan las distintas fases y procedimientos a abordar.

En la Figura 6 se muestra el entorno de programación con el sinóptico del banco. Antes de iniciar el ensayo es necesario introducir un conjunto de datos para la realización del ensayo y sin los cuales no se permite iniciar el proceso. Tales datos son la velocidad mínima de giro, la intensidad máxima del motor y la intensidad máxima del freno. Estos datos definen límites de funcionamiento de gran importancia para no dañar ni el motor *brushless* ni el freno. El botón de inicio del ensayo permanece deshabilitado hasta que no se introduzcan dichos datos.

Una peculiaridad de esta interfaz gráfica es que, una vez iniciado el ensayo (Figura 7), se pueden visualizar los valores promedio, tanto de forma numérica como gráfica, de distintas magnitudes como la tensión e intensidad del motor *brushless*, el par en el eje, la velocidad de giro y la tensión e intensidad del freno.

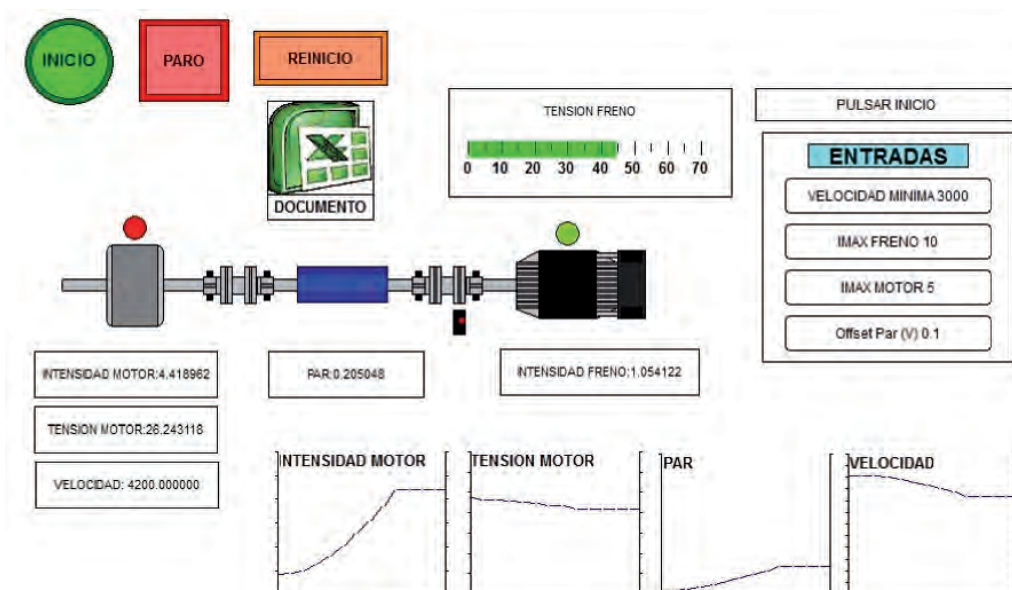


Figura 7: Interfaz de usuario una vez concluido el ensayo

Se puede observar también que hay un indicador encima del esquema del motor *brushless* y del freno que muestra el estado de éstos en cada momento. Si el indicador está en color verde significa que el funcionamiento es correcto, sin embargo si el color es rojo significa que se ha alcanzado un valor límite. La Figura 7 muestra la situación al final del ensayo y se puede apreciar que el indicador del motor *brushless* es rojo, lo que significa que el ensayo ha concluido debido a que la intensidad de este ha alcanzado su valor máximo fijado anteriormente. Así mismo, la interfaz gráfica cuenta con un pulsador de emergencia para detener el ensayo en cualquier momento.

Un valor añadido que proporciona el software utilizado es que permite tener acceso a una hoja de cálculo Excel en la que se tienen todos los valores almacenados. Mediante el tratamiento de estos datos convenientemente, se pueden generar de forma automática las curvas características del motor *brushless* tal y como se verá en el siguiente apartado, permitiendo por ejemplo su incorporación en un informe técnico.

4. REALIZACIÓN DEL ENSAYO Y RESULTADOS

En esta sección se describe el proceso necesario para obtener una serie de curvas características de los motores *brushless* a partir de un único ensayo que comienza alimentando el sistema de control del motor *brushless* a su tensión nominal (mantenida durante todo el ensayo) siendo nulo el par resistente en el eje (excepto el par de pérdidas mecánicas). En esta situación el motor alcanza su máxima velocidad. A continuación, se varía progresivamente la tensión aplicada al freno en escalones predefinidos en la programación del PLC, estableciendo así un par resistente

en el eje y variando así su velocidad. Durante este proceso, el PLC almacena los valores promedio de distintas magnitudes como la tensión e intensidad del motor *brushless*, la velocidad de giro y el par, los cuales servirán para obtener las curvas características.

Con objeto de obtener unos valores promedios más exactos y próximos a la realidad, es importante que el proceso de captura de las distintas magnitudes esté temporizado convenientemente para permitir al motor *brushless* alcanzar su régimen permanente en cada escalón del proceso.

A medida que se frena el motor, es decir aumenta el par resistente (Figura 8), se puede observar como desciende la velocidad de giro (Figura 9). La variación que experimenta la velocidad de giro desde vacío a plena carga es del 25% aproximadamente.

A partir de los valores medidos del par y velocidad se obtiene la curva par-velocidad mostrada en la Figura 10, de gran importancia ya que proporciona información acerca de la característica par-velocidad de la carga accionada.

En la Figura 11 se ha representado la potencia útil de motor *brushless* en función de la velocidad. Se puede

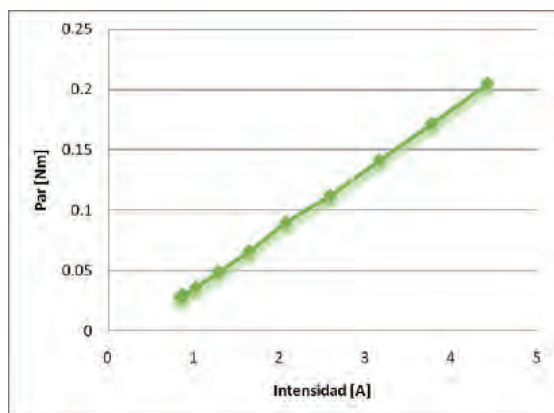


Figura 8: Curva Par-Intensidad

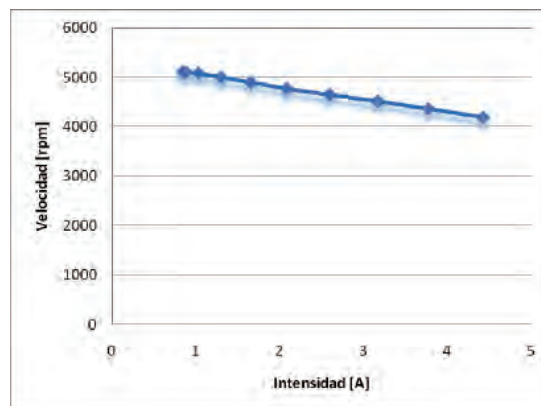


Figura 9: Curva Velocidad-Intensidad

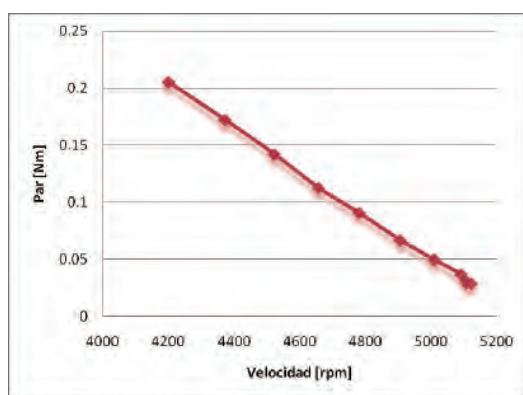


Figura 10: Curva Par-Velocidad

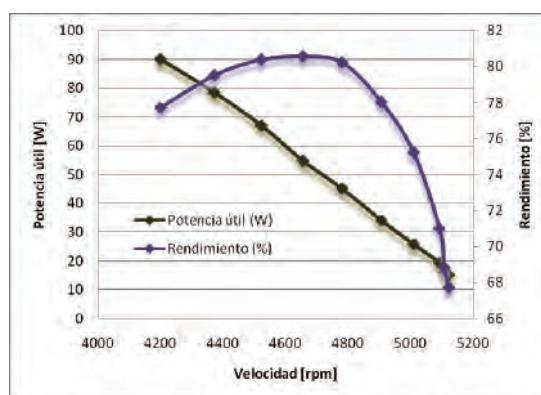


Figura 11: Curvas Potencia útil-Velocidad, Rendimiento-Velocidad

observar que a medida que aumenta la carga, aumenta también la potencia útil debido a que las variaciones del par son mucho más acusadas (del orden del 90%) que las variaciones de la velocidad (del orden del 25%). Esta curva se utiliza para verificar si se cumplen las especificaciones que generalmente imponen los fabricantes de los equipos accionados.

Por último, en la misma Figura 11 se muestra el rendimiento del motor en función de la velocidad. Se puede observar que dicha curva es bastante plana en el rango de funcionamiento normal del motor, con variaciones que oscilan entre el 78% y 80% aproximadamente.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado el diseño de un banco de ensayos para motores *brushless*, útil para obtener las curvas características de forma automatizada sin apenas la intervención del operador.

Este banco surgió como necesidad de sustituir un banco de ensayos existente en el que tanto las variaciones de las condiciones de carga como la lectura de las correspondientes magnitudes las tenía que realizar un operador.

Frente al anterior, las ventajas fundamentales del banco descrito en este artículo son la reducción del tiempo empleado en el ensayo, la disminución de los errores de medida así como la

obtención de forma automática de las curvas características. Además, esta reducción del tiempo de ensayo permite realizar el ensayo a temperatura aproximadamente constante.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Kenjo T, Nagamori S. *Permanent-Magnet and Brushless DC Motors*. 1ª Edición. USA: Oxford University Press, 1985. 194p. ISBN: 0-19-856214-4
- [2] Hanselman DC. *Brushless Permanent Magnet Motor Design*. 2ª Edición. USA: Magna Physics Pub., 2006. 392p. ISBN: 978-1881855156
- [3] Miller TJE. *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives*. 1ª Edición, USA: Oxford Science Publications, 1989. 224p. ISBN: 978-0198593690
- [4] Cyril GV. *Motores Eléctricos de Potencia Fraccionaria y Subfraccionaria*. 1ª Edición. España: Marcombo Boixareu Editores, 1978. 532p. ISBN: 84-267-0222-8
- [5] Faure B. *Máquinas y Accionamientos Eléctricos*. 1ª Edición. España: Fondo Editorial de Ingeniería Naval, 2000. 686p. ISBN: 84-921750-7-9
- [6] 3S-Smart Software Solutions GmbH. *User Manual for PLC Programming with CoDeSys 2.3* [en línea]. [ref. de 25 de noviembre 2010]. Disponible en Web: <<http://www.abb.es/>>.
- [7] Cai Y, Nishi I, Sekiguchi T. "Modelling by Petri nets with place invariants for sequential control systems". *Electrical Engineering in Japan*. 1995. Vol.115-5, p.100-111
- [8] Pallás R. *Sensores y Acondicionadores de Señal*. 4ª Edición. España: Marcombo, 2003. 480p. ISBN: 84-267-1344-0

La confianza como elemento clave en las relaciones interempresariales.

Una escala de medida



Manuel Expósito-Langa
Débora Nicolau-Julí
Josep Capó-Vicedo

Dr. en Organización de Empresas
Lcda. en Administración y Dirección de Empresas
Dr. en Organización de Empresas

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA. Dpto. de Organización de Empresas, Pl. Ferrándiz y Carbonell, 2 - 03801 Alcoy (Alicante). Tfno: +34 966 528466. maexlan@doe.upv.es; deniju@epsa.upv.es; pepcapo@doe.upv.es

Recibido: 12/11/2010 • Aceptado: 09/05/2011

Trust as a key factor in the enterprise relationships. A scale of measurement

ABSTRACT

- In recent years, companies in industrialized countries have experimented significant changes in the competitive context where they move. This has resulted in reinforcing certain factors in order to retain and win new customers such as trust, accepted as a key element in economic exchanges. In this work, and following a review of the literature, a scale measuring confidence, both with both suppliers and customers, is proposed and validated to serve as support for future models. For this has been chosen as a study sample the Valencian textile industry.
- **Keywords:** trust, confirmatory factorial analysis, textile industry.

RESUMEN

En los últimos años las empresas de países industrializados han experimentado cambios significativos en el contexto competitivo en el que se mueven. Esto les ha llevado a reforzar determinados factores con el objeto de fidelizar y conseguir nuevos clientes, como es el caso de la confianza, aceptada como elemento clave en los intercambios económicos. En este trabajo, y tras una revisión de la literatura, se propone y se valida una escala de medición de la confianza, tanto con proveedores como con clientes, que sirva de apoyo para futuros modelos. Para ello se ha escogido como objeto de estudio la industria textil valenciana.

Palabras Clave: confianza, análisis factorial confirmatorio, industria textil.

1. INTRODUCCIÓN

En las dos últimas décadas, los países industrialmente avanzados han experimentado cambios significativos en el contexto competitivo en el que se mueven. Bajo estas circunstancias, las empresas han tratado de ganar clientes al competir no sólo en el precio, sino también en factores como la velocidad

de entrega, la calidad del producto y la innovación. Esto ha forzado cambios tanto en la organización interna de las empresas, como en las relaciones interempresariales. En este contexto, el elemento confianza es ampliamente aceptado como un ingrediente clave para el intercambio económico (Beugelsdijk, 2006): es decir, no hay ninguna transacción que no requiera un mínimo de confianza entre las partes. De hecho, para algunos autores, la confianza es la variable universalmente más aceptada como base en cualquier interacción o intercambio humano.

En este trabajo se asumirá la definición de confianza propuesta por Bradach y Eccles (1989) como “*la expectativa que libera a un socio del temor de que otro socio actúe de forma oportunista*”. De esta forma, la confianza constituye uno de los elementos más determinantes del carácter relacional del intercambio.

Por otro lado, no se observa un consenso en la literatura a la hora de establecer una medida unificada de la confianza. Partiendo de esta problemática, en este trabajo se pretende aportar y validar una escala de medida de la confianza que una empresa sostiene con sus proveedores y clientes, que sirva como base para futuros modelos de investigación.

De esta forma, esta investigación se ha basado en la revisión bibliográfica de anteriores investigaciones de relevancia donde se ha estudiado y medido el concepto de la confianza (ver Anexo I). En la escala resultante se ha valorado tanto el grado de compromiso como su nivel de cumplimiento en las relaciones por parte de proveedores y clientes, así como el interés de éstos en que la relación sea beneficiosa para ambas partes, y la intención por parte de las empresas de mantener o ampliar las relaciones con sus proveedores o clientes.

A continuación, se describe tanto el objeto de estudio como el proceso seguido para la validación de la escala y las conclusiones obtenidas.

2. TRABAJO EMPÍRICO

Para llevar a cabo el trabajo de campo se ha elegido la industria textil, un sector heterogéneo y diverso, que comprende un amplio número de actividades productivas, e integrado principalmente por PYMEs de origen familiar. Se trata de un sector considerado de demanda débil y contenido tecnológico bajo, y viene caracterizado por un proceso productivo intensivo en mano de obra. Este trabajo se centra de forma particular en la industria textil valenciana, la cual se encuentra situada principalmente en las comarcas de *L'Alcoià*, *El Comtat* y *L'Alt Vinalopó* en Alicante y *La Vall d'Albaida* en Valencia. En estas comarcas se generó durante 2008 el 17% de la producción textil en España (1.825 millones de €), con una ocupación directa de algo más de 32.000 trabajadores.

Para el estudio empírico se ha considerado el total de la población de empresas textiles identificado a partir de los registros del año 2008 de la base de datos SABI¹. El listado inicial de empresas se depuró eliminando aquéllas que bien por su reducido tamaño, o por el tipo de producto, no se consideraron significativas del sector, ya que podían mostrar una excesiva heterogeneidad. A su vez, la información de SABI sirvió para establecer el control de algunas respuestas recogidas.

El trabajo se extendió durante los meses de junio a septiembre de 2009 y la fuente de información básica utilizada fue un cuestionario con escala *Likert* 1 a 7. Con anterioridad a su distribución, se realizó un cuestionario piloto que fue completado por 5 empresas seleccionadas del sector en función de su trayectoria e importancia en el mismo para la redefinición y ajuste de las variables e indicadores. El cuestionario final fue formulado tras solicitar también la opinión de un panel de expertos.

Finalmente, la realización del trabajo de campo se desarrolló en base a entrevistas con los directivos de las

empresas seleccionadas a partir de la encuesta diseñada. A continuación, en la Tabla 1 se muestra la ficha técnica del trabajo:

UNIVERSO	Empresas pertenecientes al sector textil
ÁMBITO GEOGRÁFICO	Comunidad Valenciana
MARCO MUESTRAL	739 empresas del sector textil
ELEMENTO MUESTRAL	Director de logística/ Director de operaciones
TAMAÑO MUESTRAL	156 empresas del sector textil, con un índice de respuesta del 21,1%
ERROR MUESTRAL	± 7,1%
DISEÑO MUESTRAL	Nivel de confianza del 95%, z=1,96; p=q=0,5
TRABAJO DE CAMPO	Diseño y Pre-tests cuestionario. Encuesta.
TRABAJO DE CAMPO	Junio a septiembre de 2009
INFORMACIÓN RECOGIDA	Datos básicos de la empresa, Confianza con proveedores, Confianza con clientes

Tabla 1: Ficha técnica de la investigación

2.1. MEDIDA DE LA CONFIANZA

Para hacer operativo el concepto de la confianza, se ha intentado plasmar las diferentes visiones identificadas en la bibliografía examinada. De esta forma, se considera importante incorporar la idea de compromiso y relación proveedor-cliente planteada en San Martín, Gutiérrez y Camarero (2004), Ulaga y Eggert (2006), Tian, Lai y Daniel (2008), y Suh y Houston (2010). Así, se propone el ítem 1 (Sus proveedores/clientes clave mantienen habitualmente las promesas realizadas a su empresa). Por otro lado, se encuentran referencias a la obtención de un beneficio compartido en trabajos como Ganesan (1994), Gefen, Kanahanna y Straub (2003), San Martín, Gutiérrez y Camarero (2004), Ulaga y Eggert (2006), Leonidou, Talias y Leonidou, (2008), y Suh y Houston (2010). En esta línea, se propone el ítem 2 (A la hora de tomar decisiones importantes, sus proveedores/clientes clave tienen interés en que la relación sea beneficiosa para ambas partes). Adicionalmente, se ha observado que en algunos trabajos aparece la idea de la satisfacción que se tiene respecto al proveedor y al cliente, por ejemplo en Morgan y Hunt (1994), Ganesan (1994), Gefen, Kanahanna y Straub (2003), San Martín, Gutiérrez y Camarero (2004), Johnston, McCutcheon, Stuart et al. (2004) y Ulaga y Eggert (2006), donde proponen una variable que mide directamente "la confianza". Siguiendo estos trabajos se plantea el ítem 3 (Sus proveedores/clientes clave son de confianza). A partir de la idea de la dependencia entre

¹ SABI es un directorio de empresas españolas y portuguesas que recoge información general y datos financieros.

empresas a largo plazo planteada en los trabajos de Ganesan (1994), San Martín, Gutiérrez y Camarero (2004) y Ulaga y Eggert (2006), se propone el ítem 4 (Su empresa está muy comprometida en sus relaciones con sus proveedores/clientes clave). A continuación, y haciendo referencia a la estabilidad de las relaciones mantenidas en la actualidad por parte de la empresa, como se identifica en los trabajos de San Martín (2003), Johnston, McCutcheon, Stuart et al. (2004), Ulaga y Eggert (2006) y Suh y Houston (2010), se propone el ítem 5 (Su empresa tiene la intención de mantener o ampliar su relación con sus proveedores/clientes clave). Por último, y asociado con la consideración de bienestar de la relación establecida, y siguiendo la línea de trabajos como San Martín (2003) y Ulaga y Eggert (2006), el ítem 6 propone la siguiente pregunta (Su relación con proveedores/clientes clave va más allá del mero negocio, llegando a ser de amistad o familiar).

A continuación se muestra la Tabla 2 con los ítems planteados. Se utilizará una *escala Likert* de 1 a 7, donde 1= nunca o totalmente en desacuerdo y 7= siempre o totalmente de acuerdo.

Confianza con Proveedores
1. Sus proveedores clave mantienen habitualmente las promesas realizadas a su empresa.
2. A la hora de tomar decisiones importantes, sus proveedores clave tienen interés en que la relación sea beneficiosa para ambas partes.
3. Sus proveedores clave son de confianza
4. Su empresa está muy comprometida en sus relaciones con sus proveedores clave
5. Su empresa tiene la intención de mantener o ampliar su relación con sus proveedores clave
6. Su relación con proveedores clave va más allá del mero negocio, llegando a ser de amistad o familiar
Confianza con Clientes
1. Sus clientes clave mantienen habitualmente las promesas realizadas a su empresa.
2. A la hora de tomar decisiones importantes, sus clientes clave tienen interés en que la relación sea beneficiosa para ambas partes.
3. Sus clientes clave son de confianza
4. Su empresa está muy comprometida en sus relaciones con sus clientes clave
5. Su empresa tiene la intención de mantener o ampliar su relación con sus clientes clave
6. Su relación con clientes clave va más allá del mero negocio, llegando a ser de amistad o familiar

Tabla 2: Ítems utilizados en la medida de la confianza con proveedores y clientes

3. RESULTADOS

La validez de una escala hace referencia al grado en el cual el proceso de medida está libre tanto de errores sistemáticos como de errores aleatorios (Kinnear y Taylor, 1995). La creación de una escala exige un proceso de contrastación de las propiedades psicométricas del instrumento de medida. De esta forma, se ha desarrollado un análisis factorial confirmatorio que especifique las relaciones de las medidas observadas. Las pruebas se han realizado con el *software EQS v. 6.1*.

Previamente a la realización de las pruebas necesarias para validar una escala, tal y como señala Bollen (1989), hay que asegurar la validez de contenido de la misma. Ésta constituye una evaluación subjetiva que depende del investigador, por lo que se observa que no existe un criterio objetivo. En el presente caso las escalas han sido desarrolladas siguiendo la metodología habitual del examen de investigaciones previas cuyas propiedades han sido testadas a lo largo de la literatura, lo que confirmaría dicha validez de contenido.

A continuación, con el objeto de depurar y validar las escalas utilizadas, se ha aplicado el desarrollo de modelos estructurales (Hair, Anderson y Tatham, 1999), realizando las pruebas pertinentes para medir su consistencia. Este análisis de los datos se lleva a cabo mediante el análisis factorial confirmatorio, donde se observará si se cumple la validez convergente, lo que garantiza la calidad unidimensional de los ítems, es decir, que cada ítem contribuye a la formación de un solo factor. A continuación se describen aquellos parámetros, así como el valor adecuado que deberían obtener en el análisis para poder asegurar la validez del constructo.

En primer lugar hay que observar las cargas factoriales de los ítems (λ), que no deberían ser inferiores a (0,7). Otro valor de interés viene dado a través del indicador de consistencia interna de la escala, medido a través de la fiabilidad compuesta (ρ_c), y cuyo valor es recomendable que sea superior a (0,7) (Fornell y Larcker, 1981), y el estadístico *Alpha de Cronbach*, también con un valor recomendado de (0,7). Otra medida a tener en cuenta es el indicador de la *Varianza Extraída* (AVE), donde la escala deberá presentar un valor superior a (0,5).

Por otro lado es interesante analizar los valores asociados a la bondad del ajuste del modelo. Tal y como recomiendan algunos autores (Bollen, 1989) es recomendable utilizar diferentes medidas para esta comprobación. En este caso se ha prestado especial atención a los siguientes:

- El estadístico *Chi-cuadrado* indica si el modelo se ajusta a los datos (p -valor > 0,05).
- El índice de bondad de ajuste *GFI* (*Goodness of Fit Index*) mide la variabilidad explicada por el modelo (>0,9).
- El índice de bondad ajustado *AGF* (*Adjusted Goodness of Fit index*) ajusta el índice anterior por los grados de libertad (>0,9)
- El coeficiente *CFI* (*Comparative Fix Index*) indica en qué grado es mejor el ajuste del modelo en comparación con un modelo de referencia (>0,9).

- Por último, el *RMSEA (Root Mean Square Error of Approximation)* ($<0,05$).

A continuación se discuten los diferentes AFC realizados

sobre la escala de la confianza, con el fin de validarla con los datos que se han obtenido en la muestra de empresas seleccionada.

Análisis factorial con 6 ítems	Confianza con proveedores		Confianza con clientes	
	Carga factorial (λ)	Fiabilidad	Carga factorial (λ)	Fiabilidad
1.Sus proveedores/clientes clave mantienen habitualmente las promesas realizadas a su empresa	,749	$\chi^2 = 15,150$ p-valor = ,087 GFI = ,970 AGF = ,929 CFI = ,987 RMSEA = ,066 (,000-,122) α de Cronbach = ,859 $\rho_c = ,885$ AVE = ,567	,738	$\chi^2 = 20,423$ p-valor = ,015 GFI = ,964 AGF = ,917 CFI = ,977 RMSEA = ,090 (,037-,143) α de Cronbach = ,863 $\rho_c = ,887$ AVE = ,574
2.A la hora de tomar decisiones importantes, sus proveedores/clientes clave tienen interés en que la relación sea beneficiosa para ambas partes	,811		,733	
3.Sus proveedores/clientes clave son de confianza	,751		,858	
4.Su empresa está muy comprometida en sus relaciones con sus proveedores/clientes clave	,854		,873	
5.Su empresa tiene la intención de mantener o ampliar su relación con sus proveedores/clientes clave	,797		,802	
6.Su relación con proveedores/clientes clave va más allá del mero negocio, llegando a ser amistad o familiar	,508		,473	

Tabla 3: Análisis factorial de las seis actividades de confianza e indicadores de fiabilidad

Análisis factorial con 5 ítems	Confianza con proveedores		Confianza con clientes	
	Carga factorial (λ)	Fiabilidad	Carga factorial (λ)	Fiabilidad
1.Sus proveedores/clientes clave mantienen habitualmente las promesas realizadas a su empresa	,743	$\chi^2 = 11,422$ p-valor = ,044 GFI = ,972 AGF = ,917 CFI = ,985 RMSEA = ,091 (,014-,161) α de Cronbach = ,892 $\rho_c = ,894$ AVE = ,629	,733	$\chi^2 = 9,220$ p-valor = ,101 GFI = ,979 AGF = ,937 CFI = ,991 RMSEA = ,074 (,000-,147) α de Cronbach = ,895 $\rho_c = ,900$ AVE = ,645
2.A la hora de tomar decisiones importantes, sus proveedores/clientes clave tienen interés en que la relación sea beneficiosa para ambas partes	,815		,733	
3.Sus proveedores/clientes clave son de confianza	,756		,851	
4.Su empresa está muy comprometida en sus relaciones con sus proveedores/clientes clave	,854		,881	
5.Su empresa tiene la intención de mantener o ampliar su relación con sus proveedores/clientes clave	,794		,805	

Tabla 4: Análisis factorial de las cinco actividades de confianza e indicadores de fiabilidad

La Tabla 3 muestra el primer AFC, donde se puede comprobar que el último ítem (6. Su relación con proveedores/clientes clave va más allá del mero negocio, llegando a ser amistad o familiar) tiene cargas factoriales con valores inferiores a (0,7) en ambas escalas. Por otro lado, la *Chi-cuadrado*, tiene un p-valor cercano a (0,05), superándolo en el caso de los proveedores, mientras que los indicadores GFI, AGF y CFI tienen valores superiores a (0,9), como es deseable. El RMSEA de los proveedores contiene el valor cero en el intervalo, y en los clientes su valor es próximo. Tanto los valores del *Alpha de Cronbach* como la fiabilidad compuesta para los proveedores como para los clientes, son aceptables. Por último, el análisis de la varianza extraída (AVE) da valores superiores a (0,5). A partir de estos resultados, es interesante desarrollar un nuevo AFC eliminando el ítem 6 de la escala.

Este nuevo AFC aparece en la Tabla 4, pudiéndose comprobar que todos los ítems tienen cargas factoriales superiores a (0,7) y que el p-valor de la *Chi-cuadrado* es cercano a (0,05) en el caso de la escala de clientes, y mayor para proveedores. Por lo que respecta a los indicadores GFI, AGF y CFI, todos tienen valores superiores a (0,9) tanto en el caso de proveedores como de clientes. En cuanto al indicador RMSEA de proveedores, se puede comprobar que el cero está muy próximo al intervalo, mientras que en el caso de los clientes está incluido en el mismo. Los valores de *Alpha de Cronbach* y de fiabilidad compuesta son superiores a (0,7). Por último, el AVE es superior a (0,5) en ambos casos. Al ser todos los valores aceptables, se puede concluir que estos cinco ítems integrarían una escala validada para la confianza.

4. CONCLUSIONES

Mediante este trabajo se ha pretendido contribuir a la literatura sobre el concepto de la confianza mediante una propuesta y validación de dos escalas de medida, una para proveedores y otra para clientes. Para cumplir con el objetivo propuesto se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica de aquellos trabajos considerados como relevantes. A continuación se ha sintetizado una escala de medida para proveedores y clientes, integrada inicialmente por 6 ítems, lo que ha permitido una mejor comprensión del concepto y que ha sido necesario depurar mediante sucesivos análisis factoriales confirmatorios.

El resultado de este análisis ha proporcionado apoyo empírico a otras investigaciones realizadas sobre la confianza, como por ejemplo Morgan y Hunt (1994), Ganesan (1994), San Martín, Gutiérrez y Camarero (2004), Ulaga y Eggert (2006), Tian, Lai y Daniel (2008), Leonidou, Talías y Leonidu (2008) y Suh y Houston (2010), entre otros. Sin embargo, la escala final, tanto para proveedores como para clientes, ha sido validada únicamente con 5 de los 6 ítems. Los ítems definitivos han sido: mantenimiento de las promesas; interés en que la relación sea beneficiosa para

ambas partes; ser de confianza; compromiso con la relación e intención de mantener y ampliar las relaciones.

Sin embargo, un ítem no ha sido contemplado en la escala final (relación más allá del mero negocio, llegando a ser de amistad o familiar). Se ha considerado que por su particularidad puede no haber sido valorado adecuadamente por parte de los encuestados. Si se compara con el resto de ítems, éstos implican el desarrollo de relaciones más formales, y tal vez ésta sea la causa que ha llevado a que el ítem no haya sido adecuadamente percibido por los encuestados, y, por tanto, no cumpla los requisitos para formar parte de la escala de la confianza.

En definitiva, se puede considerar que el objetivo propuesto en este trabajo de investigación ha sido cubierto mediante la depuración final de las escalas. Cabe apuntar que este resultado es un primer paso para continuar con investigaciones futuras, donde se propondrán modelos teóricos que permitan estudiar la influencia de la confianza sobre otras variables basadas en la integración entre empresas, y su posible efecto sobre el resultado empresarial.

El trabajo cuenta a su vez con algunas limitaciones que cabe señalar. Así, por ejemplo, la confianza se ha medido en un momento puntual, pero hay que tener en consideración que es el resultado del transcurso de relaciones desarrolladas a lo largo del tiempo, por lo que en el futuro será interesante plantear un análisis longitudinal. Cabe a su vez plantear la validación de la escala en otros sectores industriales, quizá no tan concentrados geográficamente como el textil valenciano. Esto permitiría observar si las escalas son robustas en otros contextos. En este caso, se debería desarrollar un proceso de invarianza métrica para comprobar si los resultados son consistentes en ambos grupos y si los conceptos que se miden se interpretan de la misma manera.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Educación y Ciencia, Plan Nacional de I+D+i (2007-2010), proyecto “El Distrito Industrial: el impacto del Capital Social sobre la Gestión de la Cadena de Suministro” (SEJ2007-62876/ECON).

ANEXO I. TRABAJOS RELATIVOS A LA CONFIANZA

Autor/es	Muestra	Escala de la Confianza	Ítems
Morgan y Hunt (1994)	Minoristas de neumáticos de vehículos	Validada con un total de 3 ítems.	1. No se puede confiar en ocasiones, 2. Se puede contar para hacer lo correcto, 3. Tiene una alta integridad
Ganesan (1994)	Proveedores y minoristas y sus proveedores	Creación propia. La escala de confianza del cliente con el proveedor se ha validado con un total de 5 ítems y la escala de confianza del proveedor en el cliente con un total de 3 ítems	<p>Cliente con Proveedor:</p> <p>1. Este proveedor se ha esforzado por nosotros en el pasado, 2. Este proveedor se preocupa por nosotros, 3. En tiempos de escasez este proveedor se ha portado bien con nosotros, 4. Este proveedor es como un amigo, 5. Creemos que este proveedor ha estado siempre a nuestro lado.</p> <p>Proveedor con cliente:</p> <p>1. Este cliente ha hecho esfuerzos por nosotros en el pasado, 2. El cliente se preocupa por mi bienestar, 3. En tiempos con problemas de entrega este cliente ha sido muy comprensivo.</p>
Doney y Cannon (1997)	Datos de compra de las empresas dedicadas a la fabricación industrial	A partir del trabajo de Ganesan (1994) y creación propia. Validada con un total de 7 ítems.	1. Este vendedor ha fracasado con el trabajo realizado con nosotros, 2. Este vendedor no hace afirmaciones falsas, 3. Creemos que este vendedor no se abre totalmente al trato con nosotros, 4. Este vendedor solo está preocupado por sí mismo, 5. Este vendedor no parece preocuparse por nuestras necesidades, 6. La gente de la empresa no se fía de este vendedor, 7. Este vendedor no es digno de confianza.
Gefen, Karahanna y Straub (2003)	Datos de visitantes y su intención de compra en un sitio web	A partir de los trabajos de Ganesan (1994) y Doney y Cannon (1997). Validada con un total de 7 ítems.	1. En base a mi experiencia con vendedores anteriores, sé que este es honesto, 2. En base a mi experiencia con vendedores anteriores, sé que este se preocupa por los clientes, 3. En base a mi experiencia con vendedores en el pasado se que este no es oportunista, 4. En base con mi experiencia con vendedores en el pasado, se que este ofrece un buen servicio, 5. Basándome en experiencias anteriores con vendedores, este es previsible, 6. Basándome en experiencias con proveedores anteriores, sé que este es digno de confianza, 7. Basándome en experiencias anteriores se nota que este vendedor conoce su mercado.
Johnston, McCutcheon, Stuart et al. (2004)	Miembros de la asociación de gerentes de compra de Canadá	A partir de los trabajos de Ganesan (1994) y Doney y Cannon (1997). Validada con un total de 4 ítems.	1. Tenemos gran confianza personal en la otra parte, 2. Tenemos confianza en que se establezca un negocio fuerte con la otra empresa, 3. Siempre podemos confiar el uno con el otro, 4. Creo que ha trabajado duro para mantener en el futuro una relación con mi empresa.
San Martín, Gutiérrez y Camarero (2004)	Directivos de los servicios de garajes y sus clientes habituales	A partir de los trabajos de Morgan y Hunt (1994), Doney y Cannon (1997) y Ganesan (1994). Validada con un total de 8 ítems	1. Confianza en el garaje X con competencia profesional, 2. Creencia que el garaje X tiene un personal altamente cualificado, 3. La confianza en las buenas intenciones que tienen el garaje X, 4. La creencia de que el garaje X cumplirá sus promesas, 5. Las preocupaciones del garaje X acerca de la satisfacción del cliente, 6. EL garaje X se esfuerza por dar una buena atención personal, 7. El garaje X ofrece información detallada a sus clientes sin que la soliciten, 8. El estilo del trabajo del garaje X es el que más me gusta.
Uлага y Eggert (2006)	Fabricantes químicos, mecánicos y de la industria eléctrica	A partir de los trabajos de Sullivan y Peterson (1982), Morgan y Hunt (1994), Ganesan (1994) y Doney y Cannon (1997). Validada con un total de 5 ítems.	1. El proveedor principal mantiene la promesa que hace a nuestra empresa, 2. El proveedor principal se preocupa de que nuestro negocio tenga éxito, 3. El proveedor principal considera nuestro bienestar así como el suyo propio a la hora de tomar decisiones importantes, 4. La empresa confía en que el proveedor principal siempre tiene los intereses de la misma en mente, 5. El proveedor principal es digno de confianza.

Tian, Lai y Daniel (2008)	Gerentes de empresas de diferentes industrias	Adaptado del trabajo de Johnston, McCutcheon, Stuart et al (2004). Validada con un total de 3 ítems.	1. Por lo general las empresas mantiene las promesas que nos hacen, 2. Están preocupados por el bienestar de nuestra empresa, y nunca hacen nada por herir el mismo, 3. La compañía tiene una conducta ética
Leonidou, Talias y Leonidou (2008)	Empresas estadounidenses exportadoras al extranjero	A partir de los trabajos de Morgan y Hunt (1994) y Doney y Cannon (1997)	1. Confían unos en otros para mantener un secreto comercial relativo a la relación de trabajo, 2. Sospechan unos de otros por un comportamiento caracterizado por el engaño y/o el fraude.
Suh y Houston (2010)	201 empresas compradoras elegidas al azar de una base de datos	A partir de los trabajos de Morgan y Hunt (1994), Ganesan (1994), y Doney y Cannon (1997). Validada con un total de 10 ítems (5 para la parte de benevolencia, y 5 más para la parte de integridad)	Benevolencia: 1. Aunque cambien las circunstancias, creemos que los socios estarán en condiciones de ofrecer asistencia y apoyo, 2. El socio se preocupa por nuestro bienestar cuando se toman decisiones importantes, 3. Cuando compartimos los problemas, sabemos que van a responder con comprensión, 4. Podemos contar que en el futuro las decisiones tomadas por el socio no nos afectarán, 5. Cuando tratamos cosas importantes, podemos contar con el apoyo del socio. Integridad: 1. Aún cuando nuestro socio nos da una explicación poco probable, estamos seguros de que dice la verdad, 2. El socio nos informa de aquello que resulta inexacto, 3. El socio mantiene las promesas que nos hace, 4. Cuando el socio nos da algún consejo, sabemos que está queriendo ayudarnos, 5. Contamos con nuestro socio totalmente.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Beugelsdijk S. "A note on the theory and measurement of trust in explaining differences in economic growth". *Cambridge Journal of Economics*. 2006, Vol.30, p. 371-387.
- Bradach JL, Eccles RG. "Price, authority, and trust: From ideal types to plural forms". *Annual Review of Sociology*. 1989, Vol. 15, p. 97-118.
- Bollen KA. *Structural equations with latent variables*. New York: John Wiley & Sons, 1989.
- Doney PM, Cannon JP. "An examination of the nature of trust in buyer-seller relationships". *Journal of Marketing*. 1997, Vol. 61- 2, p. 35-51.
- Fornell C, Larcker DF. "Evaluating structural equations models with unobservable variables and measurement error". *Journal of Marketing Research*. 1981, Vol. 18, p. 39-50.
- Ganesan S. "Determinants of long-term orientation in buyer-seller relationships". *Journal of Marketing*. 1994, Vol. 58-2, p. 1-19.
- Gefen D, Kanahanna E, Straub DW. "Trust and tam in online shopping: an integrated model". *MIS Quarterly*. 2003, Vol. 27-1, p. 51-90.
- Hair JF, Anderson RE, Tatham RL, et al. *Análisis Multivariante*. Madrid: Ed. Prentice Hall, 1999.
- Johnston DA, McCutcheon DM, Stuart, FI, Kerwood H. "Effects of supplier trust on performance of cooperative supplier relationships". *Journal of Operations Management*. 2004, Vol. 22-1, p. 23-38.
- Kinnear JC, Taylor JR. *Investigación de mercados: un enfoque aplicado*. Madrid: Ed. McGraw Hill, 1995.
- Leonidou LC, Talias MA, Leonidou CN. "Exercised power as a driver of trust and commitment in cross-border industrial buyer-seller relationships". *Industrial Marketing Management*. 2008, Vol. 37, p. 92-103.
- Morgan RM, Hunt SD. "The commitment-trust theory of relationship marketing". *Journal of Marketing*. 1994, Vol 58-3, p. 20-38.
- San Martín S, Gutiérrez J, Camarero C. "The consumer's relational commitment: main dimensions and antecedents". *Journal of Retailing and Consumer Services*. 2004, Vol. 11, p. 351-367.
- Suh T, Houston MB. "Distinguishing supplier reputation from trust in buyer-supplier relationships". *Industrial Marketing Management*. 2010, Vol. 39, p. 744-751.
- Tian Y, Lai F, Daniel F. "An examination of the nature of trust in logistics outsourcing relationship Empirical evidence from China". *Industrial Management & Data Systems*. 2008, Vol. 108-3, p. 346-367.
- Ulaga W, Eggert A. (2006). "Relationship value and relationship quality, broadening the nomological network of business-to-business relationship". *European Journal of Marketing*. 2006, Vol. 40- 3/4, p. 311-327.

Evaluación de la red de carreteras: utilización de un vehículo instrumentado para el registro de situaciones potencialmente peligrosas



Pablo Luque-Rodríguez*
Daniel Álvarez-Mántaras*
Johan Wideberg**

Doctor Ingeniero Industrial
Doctor Ingeniero Industrial
Doctor Ingeniero Industrial

* UNIVERSIDAD DE OVIEDO, ETSIG. Campus de Viesques, s/n – 33204 GIJÓN.
Tfno: +34 985 182059. luque@uniovi.es

** UNIVERSIDAD DE SEVILLA. Escuela Técnica Superior de Ingenieros. C/ Descubrimientos, s/n -
41092 SEVILLA. Tfno: +34 626 271944. wideberg@us.es

Recibido: 08/11/2010 • Aceptado: 21/03/2011

Evaluation of the road network: Use of a monitoring vehicle for the record of potentially dangerous events

ABSTRACT

- This work presents the methodology for the identification of events or potentially dangerous situations in road traffic, using a vehicle type fitted with conventional electronic devices. This development represents the basis of the design, development, construction and testing of an intelligent system of transport (ITS) to monitor a road network in order to identify and locate accurately points roads where situations arise that can be potentially dangerous driving and that, therefore, may have as a consequence an accident. On board system consists of a hardware which includes a mobile terminal BlackBerry from the manufacturer RIM (Research In Motion), equipped with GPS and internal accelerometer and possibility to connect bluetooth and wireless interfaces for reading and transmission of data from the vehicle CAN-bus.
- **Key Words:** Intelligent Transport System (ITS), CAN-bus, road network, sensed vehicle.

RESUMEN

Este trabajo plantea la metodología para la identificación de eventos o situaciones potencialmente peligrosas en el tráfico terrestre por carretera, utilizando un vehículo tipo turismo equipado con los sistemas electrónicos convencionales. Este desarrollo es uno de los pilares en los que se asienta el diseño, desarrollo, construcción y ensayo de un sistema inteligente de transporte (ITS) que permita monitorizar una red de carreteras para identificar y localizar de forma exacta los puntos de las carreteras donde se producen situaciones que pueden ser potencialmente peligrosas para la conducción y que, por tanto, pueden tener como consecuencia un accidente. El sistema embarcado está formado por un hardware que consiste en un terminal de telefonía móvil modelo BlackBerry del fabricante RIM (*Research In Motion*), equipado con GPS y acelerómetro interno y posibilidad de conexión *bluetooth* y un interfaz inalámbrico para la lectura y transmisión de los datos de la red CAN del vehículo.

Palabras Clave: Sistema Inteligente de Transporte (SIT), CAN-bus, red de carreteras, vehículo instrumentado.

1. INTRODUCCIÓN

La siniestralidad en las carreteras europeas se ha reducido notablemente en la última década, pese al espectacular aumento del parque automovilístico, debido a la mejora de infraestructuras junto con la incorporación de nuevas tecnologías, como el ABS, ESP, etc., las cuales han incrementado la seguridad del vehículo y reducido de forma significativa las víctimas mortales en Europa en la última década.

Sin embargo, está reducción no es suficiente, sobre todo teniendo en cuenta que la siniestralidad al volante en España es muy superior a la de los países de nuestro entorno. De hecho, sorprende la capacidad de las autoridades y de la sociedad para asimilar con normalidad la muerte en la carretera de miles de personas todos los años.

Estos accidentes, según las últimas estadísticas de la Comunidad Europea, arrojan un valor de 44.000 víctimas mortales. Estas cifras evidencian el enorme interés social y económico en la seguridad vial y motivan que el Libro Blanco del Transporte de la UE fije el objetivo de reducir al 50% el número de víctimas mortales, mejorando los vehículos, las infraestructuras y las comunicaciones.

En la investigación de los accidentes de tráfico, la caracterización del mecanismo o sucesión de fases del accidente se realiza mediante un procedimiento que se denomina reconstrucción. La reconstrucción tiene por objeto determinar no únicamente las fases del accidente, sino también otros aspectos cinemáticos como son las posiciones, trayectorias y velocidades de los elementos (vehículos, peatones, ciclistas, animales...) implicados en el accidente. Estas variables cinemáticas no tienen por qué ser constantes en el tiempo. Es decir, para cada instante de tiempo la velocidad puede ser diferente (como ocurre en un movimiento acelerado), de ahí que la reconstrucción que analiza parámetros espaciales (posiciones, trayectorias...) en función del tiempo, se denomina reconstrucción espacio-temporal del accidente.

Una vez determinado el mecanismo, y, por tanto, la secuencia de fases y la evolución espacio-temporal del accidente, la investigación, en su fase final, se orienta a la identificación de las causas que lo han producido, dando respuesta al porqué. Un análisis detallado de las causas del accidente diferenciará dos aspectos básicos que dan respuesta a las siguientes preguntas:

- ¿Por qué se ha iniciado el accidente?
- ¿Por qué se ha llegado a tener esos efectos (daños)?

La primera pregunta se responde con el conocimiento de las causas que originan el accidente; se basan en un análisis de las condiciones previas al accidente que permita determinar el conjunto de elementos y factores de inseguridad activa que lo han producido. A la segunda pregunta se le buscará respuesta en las acciones que se han generado en el accidente (fuerzas, deceleraciones...) y los umbrales de daño, tanto en las personas (umbrales biomecánicos) como en las cosas (umbrales de resistencia de los materiales). La aplicación desarrollada pretende ser una fuente de información objetiva para una investigación sistemática de la problemática asociada a los accidentes de tráfico.

2. ANTECEDENTES

En el panorama internacional existe una gran cantidad de proyectos para la mejora del uso de información obtenida por los vehículos, lo que represente un paso importante en la mejora de la conducción y de la seguridad vial. Desde el comienzo de la producción masiva de automóviles, los fabricantes han realizado pruebas para mejorar la resistencia estructural y para reducir los fallos mecánicos de los coches, pero técnicas tradicionales son costosas y se limitan a las

pistas de prueba y a programas de simulación que no pueden recrear condiciones reales de conducción.

Sin embargo, con los recientes avances como la telemetría y la capacidad de extraer datos de varios sensores del vehículo a través de buses de datos (como CAN (*Controller Area Network*), LIN, FlexRay, SAE, etc.) se podría aprovechar la valiosa información de los numerosos sistemas embarcados que tienen los vehículos. Por otra parte, si esto se combina con el posicionamiento (geo-referenciación) GPS, existen una importante cantidad de aplicaciones que pueden ser implementadas, tales como diagnóstico y mantenimiento preventivo de vehículos, monitorización de tráfico y planificación de rutas o las redes ad-hoc. De forma adicional, es importante citar que se ha desarrollado un puerto de comunicación, común para todos los vehículos, basado en el interfaz OBD. El interfaz OBD (acrónimo en inglés de *On Board Diagnostics*, o sistema de diagnóstico embarcado) se diseñó, inicialmente, para el control de los sistemas correspondientes a las emisiones de gases y para garantizar que las emisiones de contaminantes se mantiene constante en un nivel bajo. En la actualidad representa una «puerta de entrada» a los sistemas de instrumentación y control de los vehículos, compatible con numerosos protocolos y tecnologías.

En el presente artículo se aborda el diseño e implementación de un sistema de información «vehículo a infraestructura», pero conviene mencionar otros proyectos parecidos que tratan la evaluación del vehículos, la carretera... y la relación entre los diferentes vehículos entre sí y con la infraestructura. Por ejemplo el Consorcio de Comunicación Coche a Coche (*Car-to-Car Communication Consortium* 2011 ó C2C-CC) es una agrupación de fabricantes europeos que tiene como objetivo fundamental desarrollar estándares y proyectos para demostradores de tecnología V2V (Vehículo a vehículo) y V2I (vehículo a infraestructura). Un ejemplo es el sistema *e-call*, en el que, cuando se produce un accidente (cuando salta el airbag, por ejemplo), se envía un mensaje con la localización del vehículo al centro de emergencias (112) más cercano. De esta manera, el centro de emergencias puede avisar al resto de vehículos que se acerquen al lugar del accidente. A la vez, se manda otro mensaje al centro de control de tráfico para que tome las medidas adecuadas. El sistema aunque no es muy complicado, tiene muchas opciones y presenta como principal inconveniente la normalización.

Otra posibilidad es la advertencia del riesgo local mediante la comunicación «vehículo a vehículo» (C2C o V2V). Además de la situación actual y de la velocidad del vehículo, los coches modernos recopilan una amplia gama de datos adicionales. Pongamos un ejemplo específico: características como la activación de las funciones ABS a baja velocidad y una ligera presión sobre el pedal del freno, combinadas con una temperatura exterior baja, pueden indicar la existencia de una capa de hielo o de superficies deslizantes. En ese caso, los vehículos transmiten rápida y directamente una señal de advertencia a través un sistema

WLAN (la 802.11 tradicional (b/g/a/n) no sirve para aplicaciones C2C, pero las variantes nuevas por ejemplo WAVE están diseñadas específicamente para ello) o a través de telefonía móvil a todos los vehículos en la zona. Los coches que se aproximan al lugar del peligro informan con prontitud a sus conductores mediante las señales ópticas y acústicas del monitor de a bordo para que éstos usen los frenos en caso de emergencia. Este sistema de advertencia de riesgo local ofrece también un enorme potencial en el apartado de seguridad activa en carretera.

Existen otros proyectos en Europa, Estados Unidos y Japón que están dedicados a la problemática afín a ésta. Muchos de estos proyectos están enfocados a las mencionadas comunicaciones vehículo-vehículo ó vehículo-infraestructura. Las aplicaciones propuestas son desde Internet inalámbrico, donde se usan los vehículos en el flujo de tráfico como nodos en una red, hasta propuestas enfocadas a seguridad donde la información de los sensores de seguridad se comparte entre los usuarios de la carretera. Ejemplos recientes destacables en Europa pueden ser C2C-CC (*Car to car communications consortium*, 2011)), NoW (*Network on wheels*, 2011), PReVENTive and Active Safety Applications (PReVENT, 2011), *Smart Vehicles on Smart Roads (SAFESPOT*, 2011) y *Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems (CVIS*, 2011), en EE.UU *Vehicle Infrastructure Integration (VII*, 2011) y en Japón *AHSRA/Smartway (AHSRA*, 2011).

De forma complementaria es interesante indicar la existencia de varios grupos de investigación que han desarrollado técnicas para extraer y utilizar la información disponible en la interfaz OBD-II. Algunos autores, por ejemplo Chen (*Chen*, 2009), se centran en los códigos de fallos y los registros de algunos parámetros como la velocidad. Un enfoque similar también tiene Schweppe (*Schweppe*, 2008), King (*King*, 2000) y Godavarty (*Godavarty*, 2000), que utilizan equipos integrados en la placa conectada con la interfaz OBD-II del vehículo, utilizada principalmente para fines de diagnóstico. En el trabajo de Ganti (*Ganti*, 2010), se presenta un servicio de navegación, llamado *GreenGPS*, que usa datos privados de detección de consumo de combustible y un sistema de mapas o callejeros de las ciudades, que permite a los conductores a encontrar la ruta más económica para sus vehículos entre origen-destino. El autor utiliza los datos del consumo de combustible, extraídos a través de OBD-II. Por su parte Chen (*Chen*, 2009) se centra en aplicaciones de seguridad activa fundamentales para las redes ad hoc vehiculares (VANET) e ITS, y ha diseñado un registrador o *data logger* para la recogida de datos que se implementa utilizando la tecnología OBD para grabar la velocidad y otras informaciones adicionales en tiempo real. El trabajo de Lin (*Lin*, 2007) propone un sistema que integra tanto el OBD como aplicaciones inteligentes del sistema de transporte. Su artículo se centra en el diseño del hardware y software, así como en la implementación y verificación con pruebas en carretera. Otros proyectos están encaminados a obtener un aviso de placas de hielo o adherencia baja en

general como es el caso del proyecto SRIS.

La compañía de telecomunicaciones Nokia presenta, mediante su *Smart Traffic Products Unit*, un papel fundamental en el mercado de la comunicación, información y ocio inalámbricos desde el coche. Desarrolla plataformas de comunicación e información combinando tecnologías móviles, de internet, conectividad y de localización. Esta aportación de Nokia -basado en un sistema telemático que utiliza las tecnologías Bluetooth y WAP- se ha desarrollado sobre un vehículo prototipo "Filo" de la empresa SKF.

Por otro lado, durante años, Microsoft ha estado involucrada en telemática del automóvil, una combinación de informática y telecomunicaciones. Tal es así que ya ha convencido a diversas empresas automovilísticas como BMW, Honda y Volvo, Citroën, Daimler, Fiat, Volvo, Hyundai, Mitsubishi, Subaru y Toyota, para que utilicen una versión del sistema operativo Windows CE en los complementos electrónicos del 30% de sus vehículos. Los coches con el sistema operativo de Microsoft "hablarán" cuando, por ejemplo, necesiten un cambio de aceite. Advertirán a los conductores sobre los atascos que se encuentran en su camino y buscarán rutas alternativas. También serán capaces de pagar de forma automática los peajes de las autopistas y el software que gestione será actualizado automáticamente y de forma inalámbrica y transporte al usuario.

3. VEHÍCULOS Y TECNOLOGÍAS EXISTENTES

3.1. EL VEHÍCULO COMO FUENTE DE INFORMACIÓN

Como se ha indicado anteriormente, son muchos los proyectos orientados a alcanzar un mayor aprovechamiento de la información que proporcionan los propios automóviles. Este es un paso importante para mejorar la conducción. Desde los inicios de la producción en serie de coches, los fabricantes han llevado a cabo técnicas de ensayo para mejorar la resistencia y disminuir los fallos, pero estas técnicas son costosas y están limitadas a unas pistas de pruebas y programas de simulación que no son capaces de recrear las condiciones de una conducción real.

Sin embargo, con los adelantos en los últimos tiempos, como telemetría, transmisión de datos inalámbricos y la capacidad de extraer datos de los diferentes sensores del vehículo a través del bus de datos tipo CAN (*Controller Area Network*), LIN, FlexRay, SAE, etc., se podría aprovechar la información de muchos sensores; si, además, se combina con el posicionamiento por GNSS, se podrían llevar a cabo varias aplicaciones, tales como diagnóstico y mantenimiento preventivo de vehículos, monitorización del tráfico y planificación de rutas, red tipo *car-to-car*, etc.

Posibles aplicaciones, combinando la información inherente a los sensores de un vehículo junto con el posicionamiento por GNSS (GPS y en un futuro próximo Galileo), se pueden enumerar a continuación:

- Monitorización de la infraestructura.
- Monitorización del tráfico y planificación de rutas.
- Diagnóstico y mantenimiento preventivo de vehículos.
- Monitorización del medio ambiente.
- Red tipo *car-to-car*.

De todas estas aplicaciones el primero es el objeto del enfoque de este trabajo. El objetivo científico del proyecto es implementar agentes y arquitecturas HW/SW en tiempo real que analicen eventos potencialmente peligrosos de los vehículos. Aprovechando la información, que casi cualquier vehículo moderno ya dispone a través de sus múltiples sensores junto con la red interna de comunicación (bus de datos del tipo CAN), se podrían detectar situaciones o “eventos” potencialmente peligrosos y posicionarlos sobre un mapa haciendo uso de la red GSM o de GNSS. Es decir, la información proveniente de un vehículo o red de vehículos serviría para construir un mapa de lugares donde la frecuencia de eventos es elevada y, por tanto, deben ser considerados como lugares potencialmente peligrosos.

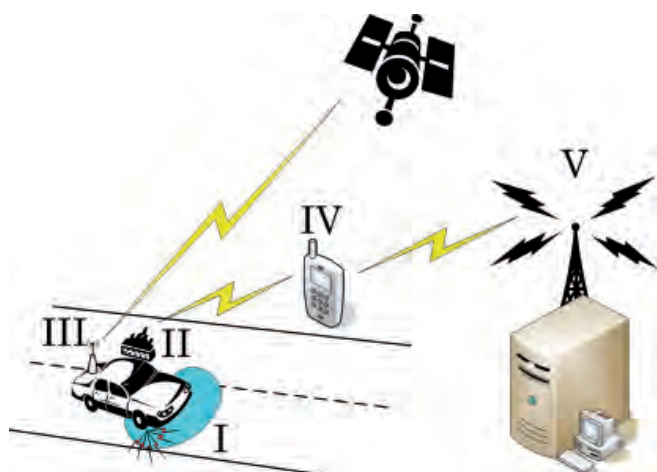


Fig. 1: Esquema del sistema piloto propuesto

La Figura 1 ilustra un ejemplo de “monitorización de la infraestructura de la red de carreteras”. En este ejemplo, se muestra un vehículo que circula por una carretera y que entra en una zona (I) con una adherencia inferior a la de otras zonas (agua, hielo, contaminación superficial...). Si dentro de esa zona, por cualquier circunstancia, se activara algún dispositivo de seguridad pasiva o activa o se sobrepasara algunos umbrales predefinidos en los valores medidos en alguno de los sensores del coche, se puede inferir que ha ocurrido algún “evento” anormal mediante el bus CAN y el interfaz OBD (II). Simultáneamente, se consulta la posición de dicho vehículo mediante el GNSS (III). Tanto el código del “evento” como las coordenadas del vehículo son capturados con un terminal de telefonía móvil (IV) con conexión inalámbrica con el vehículo, y posteriormente, a través del interfaz radio (GSM o UMTS), son enviados a una base de datos (V) para ser procesados con un software

e introducidos en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Finalmente, con una muestra de vehículos suficiente, se genera un mapa con “puntos singulares”, es decir, puntos donde el sistema propuesto ha detectado algún evento potencialmente inseguro.

3.2. CAPTACIÓN DE DATOS DISPONIBLES EN EL BUS CAN MEDIANTE EL INTERFAZ OBD

Como se ha indicado, la identificación de los eventos potencialmente peligrosos se basará en el procesado de información proveniente de sensores embarcados en el vehículo. Bajo la premisa de realizar un sistema de bajo coste y, por tanto, fácilmente aplicable a una amplia flota de vehículos se ha optado por aprovechar la información disponible en el bus CAN al que se accederá por medio del interfaz OBD.

Se conoce como OBD (*On Board Diagnostics*) a una metodología de diagnóstico aplicable a vehículos de carretera. Actualmente se emplean diferentes estándares como son OBD-II (Estados Unidos), EOBD (Europa) y JOBD (Japón) que aportan un acceso y control casi completo del motor y otros dispositivos del vehículo. El OBD estaba pensado inicialmente para controlar la emisión de contaminantes gaseosos; posteriormente los diversos fabricantes han conseguido que también se pueda acceder, a través del OBD, al resto de sistemas del vehículo. Esto ha llevado a que, en la actualidad, a través del interfaz del OBD, prácticamente todo pueda ser leído, ajustado y reiniciado.

PIN	Descripción
1	Específico de cada fabricante
2	J-1850 BUS +
3	Específico de cada fabricante
4	Tierra vehículo (GND)
5	Tierra señal (GND)
6	CAN High (J-2284)
7	ISO 9141-2: Línea-K
8	Específico de cada fabricante
9	Específico de cada fabricante
10	J-1850: BUS -
11	Específico de cada fabricante
12	Específico de cada fabricante
13	Específico de cada fabricante
14	CAN Low (J-2284)
15	ISO 9141-2: Línea-L o 2ª Línea-K
16	+12V (Batería)

Fig. 2: Conector OBD-II y su pinedo

En la actualidad la información del OBD está presente bajo cinco protocolos esenciales, en función del fabricante y

del modelo, lo cual exige un trabajo adicional en el desarrollo de un sistema universal. Los protocolos utilizados son:

- SAE J1850 PWM (*pulse-width modulation* - 41.6 kbaud)
- SAE J1850 VPW (*variable pulse width* - 10.4/41.6 kbaud)
- ISO 9141-2
- ISO 14230 KWP2000 (*Keyword Protocol 2000*)
- ISO 15765 CAN (250 kbit/s or 500 kbit/s)

Los datos del OBD pueden ser completados con los disponibles dentro del CAN-bus del vehículo, a través del mismo conector de 16 pines (Figura 2), en función de la electrónica que equipó el vehículo a instrumentar. Estas capacidades del interfaz ODB han sido utilizadas en el presente proyecto para la captación de información proveniente de los sensores embarcados en el vehículo. Ha sido necesario definir los requisitos mínimos del sistema a implementar, en cuanto a parámetros a medir (por tanto, sensores a utilizar, así como el procedimiento a seguir para procesar la información de los diversos sistemas de captación) de forma que se determine lo que se consideran eventos potencialmente peligrosos, despreciando aquellos que se puedan considerar normales.

Para llegar a definir los datos que es necesario adquirir del vehículo se ha de conocer cuáles van a estar disponibles en un amplio número de vehículos. Estos datos dependerán de los sistemas de seguridad activa y pasiva con los que estén equipados. Por ello, se ha llevado a cabo la revisión de los modelos que se venden en la actualidad por los diversos fabricantes de vehículos, llegándose a determinar los sistemas que incorporan y los datos que ofrecen.

Los sistemas de seguridad activa analizados han sido:

1. Sistemas de control dinámico del vehículo: Frenos, Tracción, Dirección y Suspensión
 - Sistema antibloqueo de frenos
 - Repartidor electrónico de fuerza de frenado
 - Asistencia a frenadas de emergencia
 - Control electrónico en curvas
 - Control del par de frenado del motor en deceleración
 - Antideslizamiento
 - Control de tracción
 - Control dinámico del vehículo
 - Control del descenso/ascenso en pendientes/rampa
 - Gestión del motor
 - Cambio
 - Bloqueo electrónico del diferencial
 - Control de Velocidad Adaptativo / Control activo de la velocidad de crucero
 - Suspensión adaptable / control electrónico
 - Alerón trasero móvil
 - Dirección asistida continuamente variable en función de la velocidad
2. Alertas, asistencias a la conducción y sistemas de información al conductor
 - Sistema de información al conductor

- Control de distancia de aparcamiento
- Indicador de incidencias de neumáticos
- Alerta de cambio involuntario de carril
- Alerta de alcance
- Sistema de alumbrado activo / Encendido automático de luces de cruce, emergencia...

Los sistemas de seguridad pasiva analizados han sido:

- Airbags
- Retracción de cinturones en frenadas de emergencia
- Activación capó atropello
- Sistema de prevención de incendios
- Sistema de protección frente a vuelcos
- Inmovilizador electrónico antirrobo

En un vehículo moderno, que venga equipado con navegador y control de estabilidad (el ABS está presente en la mayoría de modelos) se dispone de una gran cantidad de información proveniente de medidas de diferentes sensores instalados de serie por el fabricante. En algunos modelos el nivel de equipamiento superior permitiría registrar datos adicionales relativos a suspensión, tracción, control direccional...

4. DEFINICIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA LA DETECCIÓN DE EVENTOS POTENCIALMENTE PELIGROSOS

Se ha desarrollado una metodología que permite, a partir de las lecturas de las variables seleccionadas, identificar los eventos potencialmente peligrosos. Se propone una clasificación en 5 niveles: blanco (sin datos), verde (nivel de riesgo bajo), amarillo (nivel de riesgo medio), rojo (nivel de riesgo alto) y negro (nivel de riesgo muy alto o accidente). La aplicación desarrollada dedicará su atención a los eventos de nivel amarillo, rojo y negro. El nivel *amarillo* está relacionado con valores bajos del margen de seguridad activa, como por ejemplo la confluencia de diversos aspectos externos como densidad de tráfico, factores atmosféricos desfavorables, infraestructuras deficientes o en mal estado. El nivel *rojo* está vinculado con valores muy bajos o nulos del margen de seguridad activa que implican la activación de sistemas de seguridad activa del vehículo, como por ejemplo el sistema antibloqueo del freno o el antideslizamiento en tracción. Por último el nivel *negro* está asociado con valores nulos o negativos del margen de seguridad activa que implican la activación de sistemas de seguridad pasiva del vehículo, lo que en la práctica lleva asociado en la gran mayoría de los casos la ocurrencia de un accidente.

5	Negro		Muy alto – accidente
4	Rojo		Alto
3	Amarillo		Medio
2	Verde		Bajo
1	Blanco		Sin datos

Tabla 1: Niveles de riesgo. Clasificación de eventos potencialmente peligrosos

El sistema permitirá clasificar los eventos en función de la causa, de manera que sea inmediata la posibilidad de respuesta. Por tanto, a modo de ejemplo, se podrá saber si el evento es debido a una actuación incorrecta del conductor, a un defecto en la vía, a las condiciones meteorológicas o a una suma de varias circunstancias.

5. DISEÑO DE UN PROTOTIPO PARA MONITORIZACIÓN DEL SISTEMA H.V.M. (HOMBRE-VEHÍCULO-MEDIO)

La validación y pruebas en una primera fase se llevaron a cabo con un ordenador portátil conectado por cable al conector OBD del vehículo. Validada la metodología y el dispositivo desarrollado en la primera fase, el siguiente paso consistió en tratar de reducir el tamaño del mismo y eliminar las conexiones por cable. Para ello se, se sustituye el ordenador portátil por un dispositivo *BlackBerry* del fabricante RIM (*Research In Motion*), equipado con GPS y acelerómetro interno (figura 3). El interfaz del primer prototipo se sustituye por un interfaz inalámbrico de comunicación por *bluetooth*.

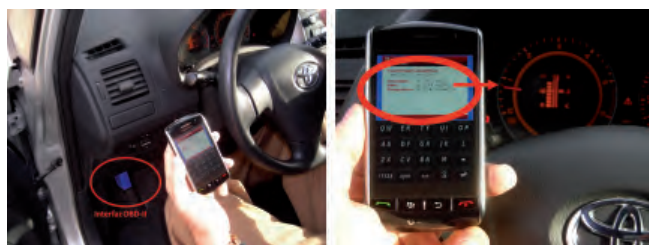


Fig. 3: Aspecto de un sistema embarcado para registro y procesado de los datos del bus CAN

El sistema incorpora una aplicación desarrollada en lenguaje Java para interactuar con el dispositivo. El número de variables que se pueden extraer con esta aplicación es muy elevado. Algunas de ellas se pueden extraer directamente de las centralitas de comunicación OBD, con codificación común para todos los fabricantes, como por ejemplo la velocidad, régimen del motor, temperaturas y presiones. El valor de otras variables de los sensores y actuadores del vehículo suelen estar bajo codificación propia de cada fabricante, con lo que se deberá adaptar la aplicación a cada vehículo en particular. Algunos ejemplos pueden ser la velocidad angular de las ruedas, parámetros del ABS, ESP, airbags o de sensores acelerómetros. Con el diseño abierto y modular del software desarrollado es posible acceder a toda la información disponible en el bus CAN, sin más que “personalizarlo” para vehículo y aplicación.

Una vez que se han obtenido los datos en el dispositivo *BlackBerry*, y usando sus capacidades de comunicación dentro de las redes de telefonía móvil, se genera un mensaje corto (SMS) donde se envía a una estación central la información de los eventos ocurridos, según la codificación

anteriormente referenciada. Los datos enviados dependerán del tipo de evento, pero siempre permitirán identificar la posición (extraída de la geo-referenciación del evento), fecha y hora, tipo de evento, alarmas o niveles que han generado el evento y valores de diversas variables implicadas y significativas del evento (aceleración longitudinal o lateral, velocidad...) y otros valores medioambientales como la temperatura.

Los diferentes eventos son recopilados y agregados a una base de datos en la estación central fija, como se esquematizaba en la Figura 1, para su posterior análisis y representación, como se comenta en el apartado siguiente.

6. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En las siguientes Figuras (4 y 5) se muestra la representación de los eventos en un Sistema de Información Geográfica (SIG) básico y de fácil acceso, como es Google Earth® de los eventos potencialmente peligrosos registrados tras la circulación, por la red de carreteras, de un vehículo equipado con el sistema desarrollado. El sistema genera finalmente un archivo, con extensión (.kmz), donde se incluyen datos del evento y su posición. Como se puede ver, se utiliza el código de colores descrito para identificar gráficamente el evento. Pulsando sobre cada punto, como se representan en la Figura 4, se accede a la información registrada de las diferentes variables, tal y como se muestra en la Figura 5.



Fig. 4: Representación de los puntos donde han ocurrido eventos potencialmente peligrosos

Como conclusión final del trabajo realizado se puede indicar que el importante grado de sensorización presente de serie en los vehículos actuales permite acceder a una gran cantidad de información dinámica. Esta información puede ser registrada en tiempo real y enviada a un sistema que la procese en combinación con la posición (espacial y temporal) de cada vehículo dentro de la red de carreteras.



Fig. 5: Detalle de la información asociada a un evento registrando

Los resultados, directos e indirectos, que se pueden obtener mediante esta técnica son de un amplio espectro y la explotación de los mismos dependerá de la naturaleza del estudio que se quiere realizar. En este proyecto se ha buscado variables del vehículo relacionados con la seguridad y lugares potencialmente peligrosos o conflictivos, sin embargo, existe un potencial muy importante para hacer otro tipo de estudios como medioambientales o de utilización de infraestructuras.

7. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Fomento a través de las Ayudas a la Realización de Proyectos I+D en el Área de Transportes FOM/2077/2006. El proyecto “Sistema inteligente de mejora de la seguridad y eficiencia del transporte mediante tecnologías GNSS y de telefonía móvil. Aplicación a las redes de transportes españolas” correspondiente a la convocatoria ORDEN FOM/2251/2006 (BOE de 6 de julio de 2006) del área de Transporte del Ministerio de Fomento y aprobado con la referencia FOM/2006/9 por ORDEN FOM/3856/2006 (BOE de 19 de diciembre de 2006).

8. BIBLIOGRAFÍA

- AHSRA/Smartway [en línea, ref. febrero de 2011]. Disponible en Web: <<http://www.mlit.go.jp/road/ITS/Smartway/pre.html>>.
- Álvarez-Mántaras D, Luque-Rodríguez P, González-Carbajal-García JM. *Investigación de accidentes de tráfico. La toma de datos*. 1ª edición. Madrid: Thomson-Paraninfo, 2005. 484p. ISBN 84-9732-403-X
- Car to car communications consortium [en línea, ref. febrero de 2011]. Disponible en Web: <<http://www.car-to-car.org>>.
- Chen Y, Xiang Z, Jian W et al. “Design and implementation of multi-source vehicular information monitoring system in real time” En: *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics* (Shenyang, China agosto 2009), p. 1771 –1775.

- CiA, CiA 301 DS V4.0.2: *CANopen Application Layer and Communication Profile*. Marzo 2005.
- CVIS «Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems». [en línea, ref. febrero de 2011]. Disponible en Web: <www.cvisproject.org>.
- Ganti RK, Pham N, Ahmadi H et al. “Greengps: A participatory sensing fuel-efficient maps application” En: *Proceedings of the 8th international conference on Mobile systems, applications, and services* (San Francisco, 15 al 18 junio 2010), p. 151–164.
- Godavarty S, Broyles S, Parten M. “Interfacing to the on-board diagnostic system” En: *IEEE Vehicular Technology Conference*, (Boston 24 a 28 septiembre 2000), vol. 4, p. 2000 –2004.
- ISO. *Road vehicles diagnostic system keyword protocol 2000 application layer*. ISO/WD14230-3. ISO 1997.
- ISO. *Road vehicles diagnostic system keyword protocol 2000 data Link*. ISO/WD14230-2. ISO 1997.
- ISO. *Road vehicles diagnostic system keyword protocol 2000 physical layer*. ISO/WD14230-1. ISO 1997.
- ISO. *Road Vehicles—Controller Area Network (CAN)—Part 1: Data Link Layer and Physical Signalling*. ISO Standard-11898-1, 2003.
- ISO. *Road Vehicles—Controller Area Network (CAN)—Part 2: High-Speed Medium Access Unit*. ISO Standard-11898-2, 2003.
- ISO. *Road Vehicles—Controller Area Network (CAN)—Part 3: Low-Speed, Fault-Tolerant, Medium-Dependent Interface*. ISO Standard-11898-3, 2006.
- ISO. *Road Vehicles—Controller Area Network (CAN)—Part 4: Time-Triggered Communication*. ISO Standard-11898-4, 2004.
- ISO. *Road Vehicles—Controller Area Network (CAN)—Part 5: High-Speed Medium Access Unit With Low-Power Mode*. ISO Standard-11898-5, 2007.
- King P, Mandair H, Belton et al. “Modelling and simulation tools to calibrate an engine management on board diagnostic system” En: *IEEE Seminar on Tools for Simulation and Modelling* (Londres, 27 marzo 2000). p. 1 –5.
- Kosch T, Adler C J, Eichler S et al. “The scalability problem of vehicular ad hoc networks and how to solve it,” *IEEE Wireless Commun*, vol. 13, no. 5, p. 22–28, Octubre 2006.
- Lin C E, Shiao Y S, Li C C et al. “Real-time remote onboard diagnostics using embedded gprs surveillance technology,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, no. 3. p. 1108 –1118, may. 2007.
- Luque P, Álvarez D, Wideberg J. “Identificación de eventos potencialmente peligrosos en la red de carreteras por medio de un vehículo instrumentado” En: *Actas del 9º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica (Las Palmas de Gran Canaria, 17-20 de noviembre de 2009)*, v. XVI. 2009. p.42–50
- Luque-Rodríguez P, Álvarez-Mántaras D. *Investigación de Accidentes de Tráfico. Manual de Reconstrucción*. 1ª edición. La Coruña: Netbiblo, 2007. 477p. ISBN 978-84-9745-173-4
- Network on wheels [en línea, ref. febrero de 2011]. Disponible en Web: <www.network-on-wheels.de/about.html>.
- PREVENT. PREVENTive and Active Safety Applications” [en línea, ref. febrero de 2011]. Disponible en Web: <www.prevent-ip.org>.
- R. Bosch GmbH. *CAN Specification (Version 2.0)*. Septiembre 1991.
- SAE. *Class B data communication network Interface*. SAE J1850. SAE, 1994.
- SAFESPOT «Smart Vehicles on Smart Roads» [en línea, ref. febrero de 2011]. Disponible en Web: <www.safespot-eu.org>.
- Schweppe H, Zimmermann A, Grilly D. “Flexible in-vehicle stream processing with distributed automotive control units for engineering and diagnosis,” *Industrial Embedded Systems*, 2008. p. 74 –81.
- Schweppe H, Zimmermann A, Grilly D. «Flexible in-vehicle stream processing with distributed automotive control units for engineering and diagnosis». En *Proceedings of the International Symposium on Industrial Embedded Systems*, SIES 2008. p. 74 – 81.
- Toulminet G, Boussuge J, Laugeau C. «Comparative synthesis of the 3 main European projects dealing with Cooperative Systems (CVIS, SAFESPOT and COOPERS) and description of COOPERS Demonstration Site 4». En: *11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2008 (12–15 octubre 2008) p. 809–814
- *Vehicle Infrastructure Integration (VII)* [en línea, ref. febrero de 2011]. Disponible en Web: <<http://www.vehicle-infrastructure.org/>>.
- Wideberg J, Luque P, Álvarez D. «Herramienta para monitorización de la infraestructura viaria mediante datos del bus CAN». En: *Actas del IX Congreso de Ingeniería del Transporte, (Madrid, 7-9 julio de 2010)*, 2010. p.413
- Wikipedia. “Identification codes of obd-ii.” [en línea]. Disponible en Web: <http://en.wikipedia.org/wiki/OBD-II_PIDs>

Localización e identificación de activos soterrados mediante georadar y procesamiento de imagen



Arantza Bereciartua-Pérez
Artzai Picón-Ruiz

Ingeniera Electrónica
Dr. Ingeniero Industrial

TECNALIA - Sistemas de Información e Interacción. Parque Tecnológico, Ed.202 - 48170 Zamudio (Bizkaia). Tfno: +34 946 440 400. aranzazu.bereciartua@tecnalia.com; artzai.picon@tecnalia.com

Recibido: 22/10/2010 • Aceptado: 14/03/2011

Location and identification of buried assets by means of georadar and image processing

ABSTRACT

- There is a growing industrial interest, covering from the sector of Engineering to the Environmental Management, among others, in the location of assets and anomalies in the subsoil in an efficient way and with a reduced error rate. It is aimed to increase the security and precision in the inspection of the subsoil by means of non-invasive and fast methods that could replace more traditional methods of direct digging.

Nowadays, there is a wide range of sensors that can be used. One of them is the georadar, Ground Penetrating Radar, from now on GPR, used in many different disciplines such as archaeology, hydrology, forensics, engineering and civil engineering, among others. The geophysical prospection with GPR is a technology capable of solving the problem inherent to the knowledge of the subsoil. It allows characterising perfectly the subsoil and the structures inside, in an efficient and accurate way, with a minimum impact.

As long as the technology goes forward, in many aspects of our life, it is possible to accomplish several tasks in a fast, efficient and automated way. Image processing has consolidated as a reliable technology installed in a wide number of applications for different problems. The high accuracy and resolution of the actual cameras, as long as with the fast communication protocols and the services of the computers make possible to solve difficult problems, usually hand-crafted in the near past. In this article, we present an image processing application whose aim is to locate and identify the buried assets that can be found in a subsoil survey. Therefore, image processing techniques are applied to interpret the electromagnetic signals coming from georadar.

First, the problem to be solved is shown, and some of the approaches to the problem are enumerated, which have been tackled during last years. Next, the proposed solution is thoroughly detailed together with their constituting elements, also the obtained results and the conclusions extracted from this work are exposed.

- **Key words:** image processing, pattern recognition, machine vision, image classifiers.

RESUMEN

Existe un creciente interés industrial, desde el sector de la ingeniería a la gestión medioambiental, pasando por muchos otros, en la localización de activos y anomalías en el subsuelo de manera eficiente y con una tasa reducida de error. Se pretende incrementar la seguridad y la precisión en la inspección del subsuelo mediante métodos lo menos invasivos y lo más rápidos posible que sustituyan procedimientos tradicionales de excavación directa.

Actualmente, existe una amplia variedad de sensores que pueden ser utilizados. Uno de ellos es el georadar, *Ground Penetrating Radar*, de ahora en adelante GPR, utilizado en múltiples disciplinas como la arqueología, hidrología, forense, ingeniería y obra civil, entre otras. La prospección geofísica con georadar es una tecnología capaz de solucionar el problema inherente al conocimiento del subsuelo. Permite caracterizar perfectamente el subsuelo y las estructuras existentes en él, de forma eficaz, precisa y con un impacto mínimo.

A medida que la tecnología avanza, en muchos aspectos de nuestra vida, es posible la realización de determinadas tareas de manera más rápida, eficiente y automatizada. El procesamiento de imagen se ha consolidado como una tecnología cada vez más fiable implantada en un amplio número de aplicaciones que resuelven problemáticas diferentes. La precisión y elevada resolución que proporcionan las cámaras actualmente, junto con

los rápidos protocolos de comunicación y las prestaciones de los ordenadores posibilitan solucionar problemas difíciles, habitualmente hecho a mano en un pasado cercano.

En este artículo, se presenta una aplicación de procesamiento de imagen cuyo objetivo final es localizar e identificar los activos soterrados que pueden ser encontrados en una inspección del subsuelo. Para ello, se aplican técnicas de procesamiento de imagen para interpretar las señales electromagnéticas provenientes de un georadar.

Inicialmente, se describe la problemática a resolver, se enumeran algunos enfoques con los que se ha ido abordando en los últimos años. Se describe en detalle la solución propuesta junto con sus elementos constituyentes, así como se muestran los resultados obtenidos.

Palabras clave: procesamiento de imagen, reconocimiento de patrones, visión artificial, clasificadores.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, existe una amplia variedad de sensores que pueden ser utilizados en la prospección geofísica. Uno de ellos es el georadar, *Ground Penetrating Radar*, de ahora en adelante GPR, utilizado en múltiples disciplinas como la arqueología, hidrología, forense, ingeniería y obra civil. La prospección geofísica con georadar permite caracterizar el subsuelo y las estructuras existentes en él, de forma eficaz, precisa y con un impacto mínimo. El georadar basa su funcionamiento en la emisión y recepción de una señal electromagnética, el tiempo de vuelo indica la profundidad a la que ha llegado la señal y los cambios en la amplitud de la señal recibida dependen de los elementos que haya encontrado en su camino y que alteren su reflexión. De hecho, un elemento enterrado origina en la reflexión de la señal electromagnética una forma característica similar a una hipérbola [7].

Existen algunas compañías en el mercado que proporcionan soluciones software para la adquisición y procesamiento de los datos del georadar. Las utilidades disponibles para el procesamiento son relativamente sencillas (filtros, modificación de ganancias, aumento de contraste) y sólo pueden ser realizadas sobre la secuencia de señales adquiridas, es decir, sobre la imagen ya constituida. Esto implica, por un lado, que el usuario debe ser experto en la interpretación de las señales de georadar, y, por otro lado, que este procesamiento sea realizado off-line después de la captura, lo cual impide la identificación de elementos en el mismo momento en que el subsuelo es muestreado, aumentando la duración de la tarea de inspección. Sin embargo, ninguna de las aplicaciones realiza la inspección en el momento de la captura ni permite clasificar los activos.

El objetivo del trabajo de I+D realizado y que aquí se presenta es la realización de un software capaz de: 1) mejorar la visualización de los datos recibidos, minimizando los efectos de la atenuación de la señal y enfatizando la

información relevante; 2) localizar los activos soterrados y 3) identificar los activos asociándolos a unos tipos previamente definidos. La herramienta final a desarrollar persigue un objetivo aún más ambicioso, ya que pretende robustecer la información proveniente del georadar con la proporcionada por otros sensores, como son el Sistema de posicionamiento Global (GPS), Sistema de Información Geográfica (GIS), y combinándola con técnicas de procesamiento de imagen e inteligencia artificial.

El trabajo se ha realizado a partir de la inquietud de la empresa Wide World Geographic Services, que ha proporcionado todo su conocimiento geofísico y los medios materiales necesarios, como son el GPR, el GPS, y el GIS.

2. ALGUNAS TÉCNICAS EXISTENTES PARA LA DETECCIÓN DE ELEMENTOS SUBTERRÁNEOS

a. Gravímetros

El método de prospección gravimétrica está basado en el estudio de la variación del componente vertical del campo gravitatorio terrestre. El método gravimétrico mide las variaciones en el campo gravimétrico de la Tierra con el fin de localizar masas de mayor o menor densidad respecto al medio que lo rodea. Normalmente las medidas se realizan cerca de la superficie. Como las variaciones de densidad son bastante pequeñas, los instrumentos utilizados tienen que ser muy sensibles. Además es necesario controlar de manera precisa la elevación y latitud del terreno. Se utiliza fundamentalmente en exploración petrolera y, como método secundario, en exploración minera.

b. Magnetómetros

Se basan en la detección de variaciones del campo magnético local debidas a la presencia de estructuras subsuperficiales. Las anomalías que se miden son debidas a la imanación inducida o remanente de los materiales. Mide las propiedades magnéticas de los materiales. Las variaciones locales o anomalías en el campo magnético de la Tierra son debidas principalmente a concentraciones de material ferromagnético. Se utiliza en la detección de estructuras minerales. Es barato y útil para realizar pre-sondeos. Sin embargo, es muy sensible al ruido provocado por estructuras metálicas y no permite diferenciar entre diferentes elementos metálicos.

c. Sismógrafos

El método sísmico es artificial, es decir, necesita de una fuente generadora externa. Se basa en el cambio de las propiedades acústicas entre dos capas de diferentes materiales, que provocan la reflexión o refracción de las ondas que se inyectan. Es de gran exactitud, resolución y penetración, y se utiliza mayoritariamente en exploraciones petroleras, en la búsqueda de aguas subterráneas y en Ingeniería Civil. Permite obtener morfologías del subsuelo,

estado de compactación y fracturación de los materiales, medición de parámetros para ingeniería y geotecnia, etc.

d. Equipos de prospección eléctrica

Los métodos eléctricos exploran los potenciales eléctricos naturales y las propiedades eléctricas intrínsecas de los materiales como son la conductividad, la permeabilidad y la permitividad. Estos métodos utilizan las variaciones de las propiedades eléctricas, de las rocas y minerales, y más especialmente su resistividad. Generalmente, emplean un campo artificial eléctrico creado en la superficie por el paso de una corriente en el subsuelo.

e. Tomografía eléctrica

Como tomografía eléctrica se entiende la visualización de alguna propiedad eléctrica del subsuelo (resistividad o impedancia general), mediante secciones continuas, generalmente verticales. Esta metodología es intensiva y de alto detalle o resolución, pero muy laboriosa en la fase de colocación y adecuación de los electrodos.

3. LA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA CON GEORADAR

3.1. APLICACIONES

La prospección geofísica con georadar (Ground Penetrating Radar o GPR) es una tecnología que permite caracterizar perfectamente el subsuelo y las estructuras existentes en él, de forma eficaz, precisa y con un impacto mínimo [1].

Actualmente, existen distintas aplicaciones del GPR. No todas ellas han llegado al mismo nivel de desarrollo y tienen aún muchas limitaciones. Algunas son:

- Medición de espesores en firmes. Útil para la auscultación de carreteras y puentes.
- Estudio de anomalías en estructuras. Permite detectar variación de las propiedades electromagnéticas de los materiales.
- Ingeniería Civil. Previo a la realización de obras en el entorno, es muy recomendable comprobar el estado de las estructuras circundantes.
- Localización de estructuras enterradas en el subsuelo.
- Catastro de redes urbanas. Se puede generar un mapa cartográfico de la red de tuberías existentes en zona urbana, evitándose muchos problemas a la hora de hacer cualquier intervención.
- Geología. Localización de menas de minerales y de diferentes estratos en el terreno.
- Arqueología y restauración. Se emplea para la localización de cambios de material (grietas o existencias de elementos enterrados).
- Inspección de línea de ferrocarril. Localización de puntos de menor espesor para la prevención de accidentes.

- Preservación del Medioambiente. La inspección de terrenos con GPR permite la localización de tuberías o minas abandonadas. Se pueden identificar también áreas especialmente contaminadas.
- Determinación del espesor de hielo.

3.2. FUNDAMENTO DE FUNCIONAMIENTO, SISTEMAS EXISTENTES Y LIMITACIONES

El funcionamiento se basa en la emisión de impulsos electromagnéticos de radiofrecuencia de muy corta duración (entre 1 ns y 10 ns) que penetran en el suelo y se transmiten a través de los estratos. Parte de esta energía emitida se refleja, registrándose mediante una antena receptora cuando la onda encuentra heterogeneidades en las propiedades eléctricas de los materiales que atraviesa, mientras que otra parte continua transmitiéndose a profundidades mayores.

La señal reflejada es detectada por el receptor, en la unidad de control se amplifica y posteriormente se procesa. El resultado es un perfil vertical continuo del subsuelo o de la estructura, en la cual la abscisa corresponde a la distancia recorrida y la ordenada al tiempo que tarda la onda en encontrar la superficie reflectante y volver al receptor, es decir “tiempo doble”. Cada una de estas señales se denomina radargrama. Para calcular la profundidad, se miden los tiempos transcurridos entre la emisión y recepción de las señales, pudiendo determinarse también la extensión de la superficie reflectante una vez conocida la velocidad media de propagación de las ondas en los distintos medios. La profundidad que alcanzan las ondas está condicionada por la conductividad eléctrica de los materiales que atraviesan. También depende de la frecuencia de las ondas emitidas por la antena emisora, de forma que la profundidad de investigación es mayor cuanto más baja sea la frecuencia. El tamaño mínimo de los objetos enterrados que pueden identificarse depende de la frecuencia utilizada y de la distancia entre los puntos de medición. Dicha identificación será más exacta cuanto mayor sea la frecuencia de onda y menor sea la distancia entre los puntos de medición.

Las señales recepcionadas en un sistema GPR dependen en gran medida de las propiedades del suelo y de su composición. Cada medio posee unas características electromagnéticas propias, que son: la permitividad o constante dieléctrica relativa (ϵ), la permeabilidad magnética relativa (μ) y la conductividad eléctrica (σ). A su vez estas propiedades electromagnéticas de los medios se ven afectadas por diversos factores tales como la composición del suelo, existencia de fluidos (agua, gas, petróleo), intervalo de frecuencias empleadas en la emisión de ondas electromagnéticas al medio en los trabajos, condiciones térmicas y de presión.[7]

Existen algunas compañías en el mercado que proporcionan soluciones software para la adquisición y procesamiento de los datos del georadar, como Mala Geoscience (<http://www.malags.com/>), Geophysical Survey Systems (<http://www.geophysical.com/>), Sensor and Software (<http://www.sensoft.ca/>) o IDS

(<http://www.idscompany.it/>). Sin embargo, las utilidades disponibles para el procesamiento son relativamente sencillas (filtros, modificación de ganancias, aumento de contraste) y sólo pueden ser realizadas sobre la secuencia de señales adquiridas, es decir, sobre la imagen ya constituida. Esto implica, por un lado, que el usuario debe ser experto en la interpretación de las señales de georadar, ya que él es el que selecciona y combina las utilidades de visualización, y por otro lado, que este procesamiento sea realizado off-line, después de la captura, lo cual impide la identificación de elementos en el mismo momento en que el subsuelo es muestreado.

Otra de las dificultades añadidas es la atenuación de la señal electromagnética. Esto depende de la naturaleza del suelo inspeccionado, que realiza una mayor o menor absorción de la señal, y de la frecuencia de la antena seleccionada para la realización de la inspección. Este hecho dificulta aún más la localización de los posibles elementos que puedan encontrarse en el subsuelo.

A partir de esta situación, se detecta la necesidad de disponer de un software que facilite el trabajo del geólogo o geofísico. Se han identificado algunas investigaciones previas en la localización de activos mediante diferentes tecnologías. Inicialmente, estaba claramente enfocado a la detección automática de minas y los primeros estudios provienen de Estados Unidos, extendiéndose luego a otra serie de aplicaciones civiles, arqueológicas o de ingeniería civil. Se han realizado diferentes enfoques empleando bien tecnologías de procesamiento de imagen, de procesamiento digital de señal o de reconocimiento de patrones [1, 3, 4, 8, 9, 10,12].

4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO

4.1. APORTACIÓN DEL NUEVO SISTEMA

Los sistemas y desarrollos existentes tienen limitaciones:

- La visualización de datos provenientes de georadar en pantalla on-line tiene un procesamiento muy sencillo (aplicación de filtros o ganancias). Procesamientos más depurados on-line no son posibles. Es necesario el trabajo de oficina posterior para adecuar los archivos y poder visualizar los elementos encontrados.
- No hay ningún módulo de procesamiento que identifique la existencia de elementos automáticamente.
- No hay ningún módulo que, una vez identificada la presencia de algún elemento, incluso con supervisión de usuario, sea capaz de asociarlo a un activo concreto: tanque, tubería, cavidad, etc.
- La inclusión de técnicas de procesamiento de imagen y de inteligencia artificial es mínima.

El presente desarrollo es, por tanto, novedoso, no habiéndose encontrado nada similar en el mercado. Sus principales características son:

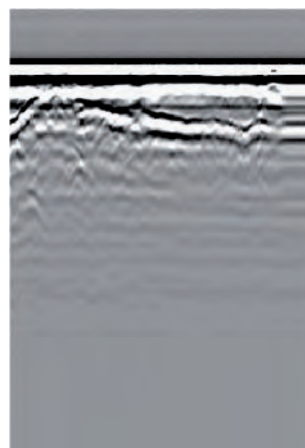
- captura de perfiles y procesamiento que mejora la visualización, minimizando la atenuación de la señal y el ruido en las capturas, principalmente a mayores profundidades.
- localización automática de los objetos enterrados.
- identificación de dichos objetos localizados, es decir, clasificación de los mismos en grupos.
- realización en tiempo real de los pasos anteriores, facilitando información al momento,
- posibilidad de que personal sin formación especializada en geofísica o tratamiento de señal pueda utilizar el aparato, dado que es el propio sistema el que realiza automáticamente el procesamiento de los datos y muestra al usuario los elementos identificados en el subsuelo.

Por tanto, la aportación en el ámbito de la I+D en el área de la prospección geofísica es notable.

5. SEÑAL PROVENIENTE DEL GEORADAR

Una de las dificultades mayores que implica la prospección por GPR es la correcta interpretación de los perfiles obtenidos. Esta es la imagen constituida a partir de cada uno de los radargramas proporcionados por el GPR a lo largo del tiempo de captura (imagen obtenida con RAMAC GPR y software Ground Vision, serán referidos más adelante).

La Fig. 2 representa un radargrama en bruto. De la composición de todos los radargramas en una inspección resulta una imagen como la que se muestra en la Fig.1. Si analizamos dicha imagen, se puede apreciar lo siguiente:



- La superficie horizontal es el cambio de medio aire / suelo, con el espesor de la capa de asfalto.
- La diferente escala de grises en los puntos son los diferentes picos de amplitud.
- La señal comienza a atenuarse muy pronto.
- Se intuyen formas curvas que contrastan con las horizontales. Sin embargo, no se sabe con seguridad si están ni a qué corresponden.

Fig. 1: Imagen obtenida con el georadar

En la parte izquierda de la imagen se intuyen las hipérbolas, pero su perfil es vago. La onda emitida es absorbida en parte por el medio, de manera que a determinada profundidad no se obtiene ningún reflejo. A mayor frecuencia de la onda emitida, menor penetración.

La solución propuesta aglutina los siguientes pasos:

1. Mejora de la imagen inicial. En las pruebas preliminares realizadas se comprobó que es posible aplicar técnicas de procesamiento de imagen para extraer más información de la señal proveniente de georadar, minimizando el efecto de la atenuación de la señal electromagnética, que, como se puede observar en la Figura 1, impide la visualización de lo que existe a determinada profundidad, por lo que se hace necesario diseñar técnicas de filtrado y enfatizado de la señal que permita eliminar el ruido ocasionado por reverberaciones y resalte los elementos de interés.

2. Localización de elementos de interés. Una vez mejorada la calidad de la imagen substancialmente, se puede proceder a la localización de otros elementos mediante técnicas de reconocimiento de patrones.

3. Identificación de la hipérbola de difracción que describe dicho elemento de interés. Una vez se haya localizado el elemento, signo de que existe algún activo soterrado, se puede identificar la curva que mejor describe la hipérbola en cada caso, es decir calcular los coeficientes a , b , g .

4. Selección del vector de entrada para la clasificación. Con estas y otra serie de características extraíbles de las imágenes, se seleccionan las más representativas.

5. Diseño de un clasificador (distribución gaussiana multivariante, GMM, SVM, métodos no paramétricos). En el caso de necesitar técnicas avanzadas como las dos últimas mencionadas, se aplicará entrenamiento supervisado (asociación de salidas a entradas establecida por el usuario). Será necesario para ello tener una amplia gama de perfiles de diferentes elementos (tuberías, tanques, cavidades, bolsas de agua...), para poder cubrir el mayor espectro posible de posibilidades.

6. PROCESAMIENTO DE LA IMAGEN DE ENTRADA

El primer paso consiste en la correcta lectura de los datos en bruto obtenidos por el sistema georadar con el software *Ground Vision*. Estos datos, se encuentran en formato RAMAC. Al medir con *Ground Vision* se generan 2 ficheros, un fichero de datos (.rd3) y un fichero cabecera (.rad). De toda esta información, para la reconstrucción se emplea el número de muestras (samples) y de trazas (traces), que se asimilan a las filas y columnas de la imagen reconstruida, respectivamente.

Fijándonos en una traza solamente, se observa que la señal recibida no proporciona información a partir de un punto determinado. He aquí una traza cualquiera:

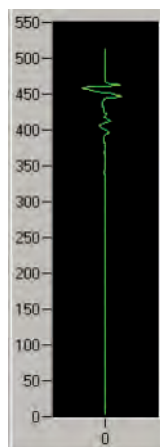


Fig. 2: Taza obtenida de Ground Vision

En la Figura 2, se aprecia que a partir de cierto punto la amplitud de la señal recibida es prácticamente imperceptible, y, en este caso, se corresponde con 1 m de profundidad. En cada traza esto puede producirse a una profundidad diferente dependiendo mucho del tipo de suelo y grado de humedad.

El método de amplificación de la señal no es trivial, debe producir una señal fácilmente observable, y debe aumentar la relación señal / ruido. Es probable que el método amplifique también los ruidos existentes en la señal, y, por ello, será necesaria la aplicación posterior de filtros.

Se propone la amplificación de la señal de manera proporcional a la inversa de la amplitud existente entre un pico y un valle consecutivos. Llamaremos a este valor amplitud instantánea. El problema de este método radica en la complejidad para obtener los valores de picos y valles con exactitud, por lo que se propone calcular la envolvente del valor absoluto de la función, cuyos valores serán proporcionales al valor de la amplitud instantánea de la señal. Para un perfil, se calcula la envolvente para cada traza y se utiliza la envolvente media para calcular la función de amplificación. Se realiza el cálculo de las envolventes de todas las trazas en el perfil. A partir de estas envolventes se obtiene la envolvente media. Se toma la inversa de la media de las envolventes como función correctora de las amplitudes. Al aplicar la función correctora se obtiene una mejora en la imagen:

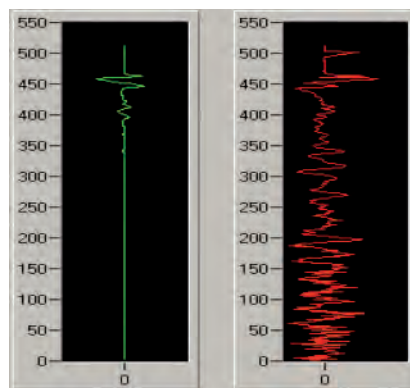


Fig.3: Taza sin corregir y corregida

En las zonas más profundas, la señal amplificada presenta más ruido, con lo que posteriormente será necesario aplicar filtros correctores a esta imagen. Sin embargo, con este tratamiento, la imagen resultante de la superposición de todas las trazas ya ha mejorado con respecto a la inicial.

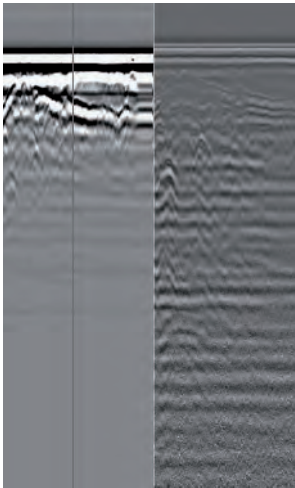


Fig. 4: Imagen inicial y con amplificación de señal

A continuación se realiza un filtro de media para la eliminación de las líneas horizontales y un enfatizado de la imagen. La imagen resultante tras todo el proceso presenta la mejoría que se puede observar a continuación:

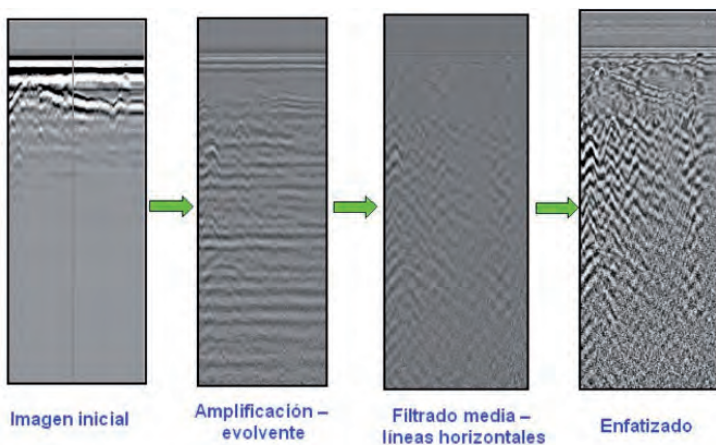


Fig. 5: Mejora sustancial de la imagen tras aplicar el algoritmo

7. LOCALIZACIÓN DE LOS ACTIVOS

Una vez que se obtiene una imagen de suficiente calidad, se debe proceder a la localización automática de hipérbolas, que indica la presencia de activos soterrados.

El reconocimiento de patrones, empleado en muchas aplicaciones de visión artificial, consiste en la selección de una región determinada, que se identifica como patrón, y a continuación la búsqueda de esa plantilla en otras imágenes.

En pruebas preliminares se han empleado herramientas software comerciales para el reconocimiento de patrones, como son IMAQ o Halcon, cuyos resultados fueron limitados. Es por ello que se ha optado por la aplicación de métodos de clasificación avanzados como Support Vector Machine (SVM) para la resolución de problemas complejos. SVM es un potente algoritmo con fuertes fundamentos teóricos [5]. El principio de SVM es construir un hiperplano óptimo para la separación de clases en el caso de separación lineal. En el caso de separación no lineal, SVM emplea un kernel, que se usa para transformar el espacio inicial en un nuevo espacio de características en el cual la separación sea lineal. Pertenece al grupo de los clasificadores generalistas lineales. Al tratarse de un método de aprendizaje supervisado, es necesaria una fase previa de entrenamiento proporcionando muestras del abanico de elementos a clasificar. Es importante para el correcto entrenamiento que la serie de ejemplos proporcionada cubra toda la casuística y con un número de muestras homogéneo para cada situación. Las principales ventajas de SVM consta en ser buenos clasificadores lineales y no lineales, son válidos para la clasificación de ejemplos con dimensiones elevadas, se adaptan a conjuntos de entrenamiento pequeños y son capaces de generalizar bien.

Se muestra a continuación un ejemplo con los resultados obtenidos.

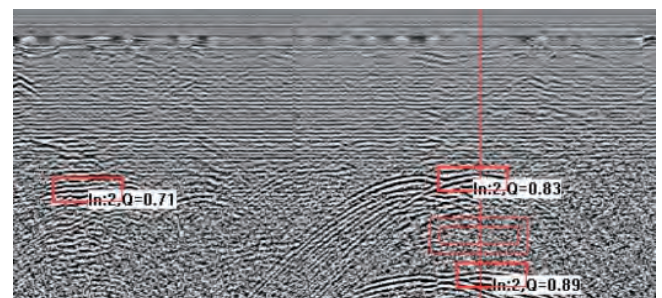


Fig. 6: Resultados de localización de activos

8. EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS

Hasta ahora se ha conseguido localizar hipérbolas. Una vez que la hipérbola está ubicada en la imagen y tenemos una coordenada (x, y) de su centro, se dibuja un rectángulo que delimite el elemento encontrado. A partir de él, se debe estimar la hipérbola que mejor describe esa región y sus parámetros característicos. Sea por ejemplo:

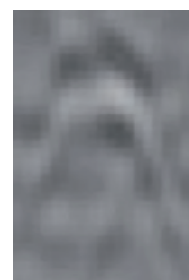


Fig. 7: Figura a partir de la cual se va a estimar la hipérbola

Para ello, se va a emplear el método de ajuste por mínimos cuadrados. La ecuación de la hipérbola a ajustar es la siguiente:

$$Y = \alpha + \beta + (x-\gamma)^2$$

Es preciso un nuevo algoritmo de procesamiento de imagen, cuya secuencia se muestra a continuación:

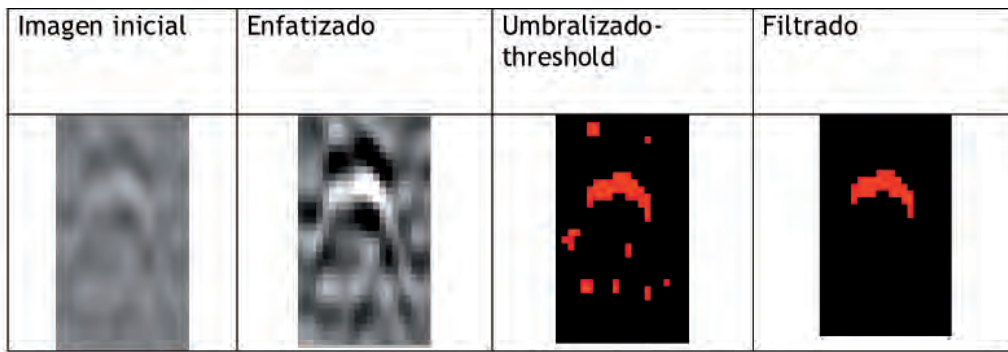


Fig.8: Secuencia de procesado

La hipérbola localizada se observa en la siguiente figura:

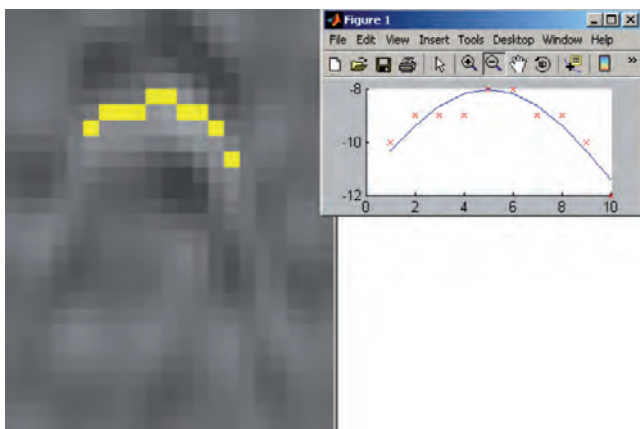


Fig. 9: Hipérbola extraída

Para cada una de las adquisiciones se ha obtenido una curva de hipérbola diferente; esto es, distintos a, b, g. Además de los parámetros de la hipérbola se pretende obtener la máxima información posible de la imagen que permita su clasificación correcta. En conclusión, los parámetros del vector de entrada son siete: alfa, beta, gamma, error de ajuste de la hipérbola, número de reverberaciones, distancia media entre las reverberaciones y anchura media de las reverberaciones.

9. IDENTIFICACIÓN DE LOS ACTIVOS

Existen varios métodos de clasificación más o menos complejos según la naturaleza y dificultad del problema. El más sencillo es el que emplea la distancia Euclídea, clasificando el elemento objeto de estudio como perteneciente a la clase con la que presenta menor distancia. Existen otros métodos, de base estadística, como la distancia de Mahalanobis[3], que además de la distancia Euclídea considera la distribución

gaussiana de la clase. Otros métodos más complejos emplean técnicas de inteligencia artificial, como son las redes neuronales o los sistemas neuro-fuzzy[2]. También es importante reseñar que en situaciones complejas en las que se requiera clasificar y donde existan un elevado número de

variables, es conveniente la reducción del número de dimensiones del vector de entrada y por tanto, del espacio en el que se clasifica. El método más extendido para llevar a cabo esta reducción es el método de PCA o Análisis de Componentes Principales, basado en la obtención de la matriz diagonalizada con los autovalores y los autovectores[6]. Se pueden seleccionar aquellos que representan el 95% de la información y emplear el nuevo sistema de referencia para la clasificación que maximizará la separación de clases.

En el caso concreto que nos ocupa se van a emplear métodos estadísticos, en concreto, la distancia de Mahalanobis como método de clasificación (si las clases son separables, es comprensible y fiable). Dado que el vector de entrada es de 7 variables, se considera lo suficientemente razonable para no aplicar reducción por PCA o similar. Una vez implementado, se ha validado la bondad del método, siendo los resultados muy satisfactorios como se verá en un apartado posterior.

10. SISTEMA INTEGRADO

El software desarrollado para la mejora de la calidad de la imagen, la detección automática de los activos y la clasificación en un tipo determinado se incluye en una aplicación final que además integra el control del GPR, y sincroniza la adquisición de datos con un GPS y un sistema de georeferenciación, siendo Google Maps en la versión actual, y será el GIS Esri en la versión final. Los datos adquiridos y los resultados son almacenados en bases de datos para poder tener registrado todo el proceso.

La interfaz de usuario de la aplicación final es la siguiente:

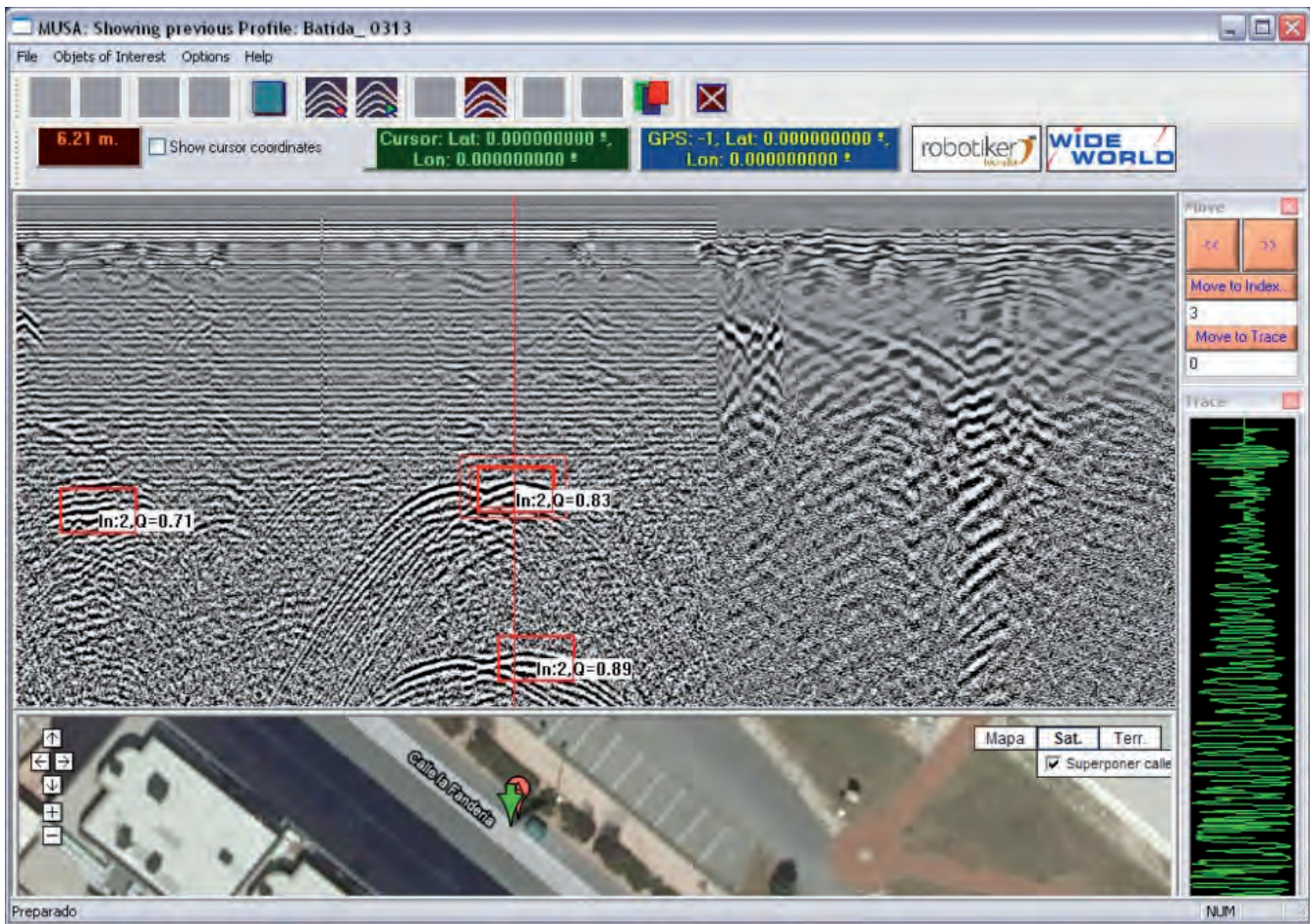


Fig. 10: Interfaz de usuario del software integrado.

11. RESULTADOS OBTENIDOS

El software realizado automatiza todo el proceso, es decir, reconstruye la imagen con las trazas capturadas del georadar, las procesa para minimizar el efecto de la atenuación de la señal y eliminar el ruido causado por las reverberaciones de la misma, localiza las hipérbolas (activos), y extrae su ecuación característica mediante ajuste por mínimos cuadrados, procesa la región de la hipérbola para obtener el resto de parámetros característicos del vector de entrada y aplica el clasificador para identificar el activo en sí.

Se ha validado la bondad de la solución propuesta a través de su aplicación a una colección de ficheros de capturas realizadas con el georadar. Los activos a clasificar presentes en dichas captaciones pertenecen a tres grandes bloques: cavidades, tuberías recubiertas con capa de arena y tuberías sin capa de arena. Se ha realizado las batidas con diferentes frecuencias de captura en el georadar (250 MHz, 500 MHz, 800 MHz).

Debido a que la frecuencia de adquisición de las señales de georadar es también un dato de entrada que se conoce a priori, se ha separado la clasificación por frecuencias. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente Tabla.

Clase	% correcto	
	Frecuencia	
Cavidad	250	100 %
	500	100 %
	800	100 %
Tubería con capa de arena	250	81.82 %
	500	92.85 %
	800	25 %
Tubería sin capa de arena	250	85.71 %
	500	83.33 %
	800	50 %

Tabla 1: Resultados de clasificación.

Las causas de que el porcentaje sea menor para tuberías en comparación al éxito rotundo para cavidades es debido principalmente a que existe muy poco contraste entre las hipérbolas de tuberías y el fondo, de manera que el proceso automático, en su tratamiento no logra sacar información

MÉTODOS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

Existen varios métodos y equipos para la prospección geofísica. Algunos de ellos se describen brevemente a continuación:

- **Gravímetros:** están basados en el estudio de la variación del componente vertical del campo gravitatorio terrestre, y mide las variaciones en el campo gravimétrico de la tierra con el fin de localizar masas de mayor o menor densidad que el medio que lo rodea. Se emplea fundamentalmente en exploración petrolera y como método secundario en exploración minera.
- **Magnetómetros:** se basan en la detección de variaciones del campo magnético local debidas a la presencia de estructuras subsuperficiales. Las anomalías que se miden son debidas a la imanación inducida o remanente de los materiales. Se emplea en la detección de estructuras minerales, se emplea para realizar pre-sondeos, sin embargo es muy sensible al ruido provocado por estructuras metálicas y no permite diferenciar entre diferentes elementos metálicos.
- **Sismógrafos:** se basa en el cambio de las propiedades acústicas entre dos capas de diferentes materiales, que provocan la reflexión o refracción de las ondas que se han inyectado (necesita una fuente generadora externa). Se emplea en exploraciones petroleras, en la búsqueda de aguas subterráneas y en ingeniería civil.
- **Equipos de prospección eléctrica:** exploran los potenciales eléctricos naturales y las propiedades eléctricas intrínsecas de los materiales como son la conductividad, la permeabilidad y la permitividad. Estos métodos utilizan las variaciones de las propiedades eléctricas, de rocas y minerales, y en concreto su resistividad. Generalmente, emplean un campo artificial eléctrico creado en la superficie por el paso de una corriente en el subsuelo. Existen varios métodos dentro de esta categoría como son medida de Resistividades, sondaje eléctrico vertical y tomografía eléctrica, siendo este último uno de lo más empleados. Mediante secciones continuas, generalmente verticales se colocan unos electrodos, a partir de los cuales y del paso de corriente se puede medir alguna propiedad eléctrica del subsuelo (resistividad o impedancia general) proporcionando alto nivel de detalle.

En cada caso concreto es posible que estos métodos sean suficientes o por el contrario se queden cortos y sea necesario complementar la información con otros. El georadar resulta un método de prospección muy interesante dado que se genera mapas del subsuelo a partir de la reconstrucción de la onda electromagnética reflejada, apreciándose los terrenos uniformes y aquellos objetos soterrados caracterizados por las hipérbolas generadas en su reflexión.

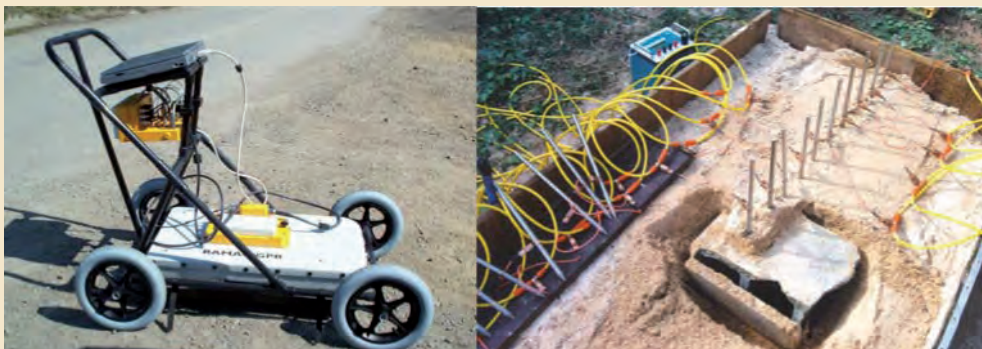


Figura 1: Equipos de Prospección Geofísica: georadar (izquierda) y disposición de electrodos para tomografía eléctrica (laboratorio de geología aplicada de la Universidad de Burgos)

que clasificar. Este efecto se ve magnificado al aumentar la frecuencia (mayor frecuencia en la señal, mayor resolución en la imagen pero menor penetración, lo que implica menos reverberaciones en algunos casos y por tanto, pérdida de datos).

Los resultados de la clasificación son buenos, aunque mejorarían notablemente si el elemento estuviera en suelo de caliza, como en el caso de cavidades o en otro donde el contraste de la señal fuera mayor. La naturaleza del suelo influye sobre manera en la transmisión de la señal y en la amplitud de la onda de reflexión que se produce al incidir sobre el activo y que es recogida por la unidad receptora del georadar.

12. CONCLUSIONES

Como resultado de todo el trabajo aquí presentado se obtienen las siguientes conclusiones:

- **Mejora de la calidad de la imagen.** La señal obtenida por el equipo de georadar aparece a veces debilitada, siendo esto ocasionado por la absorción del medio. Este fenómeno se ve agravado por el aumento de la frecuencia de emisión (más resolución y menos penetración). Es necesario amplificar la señal mediante técnicas de procesamiento de señal digital. Se ha probado multiplicando la amplitud de la onda por la inversa de la media de la envolvente de todas las trazas

para cada imagen. Los resultados obtenidos han sido satisfactorios, logrando extraer mucha más información. Se ha demostrado que amplificando la señal tal y como se ha descrito, filtrando ruidos y líneas horizontales y enfatizándola, se consiguen visualizar las hipérbolas más claramente y facilitar su búsqueda por software de manera automática.

- **Localización del activo.** Una vez localizado el activo, se ha demostrado que es posible hallar los puntos que conforman su hipérbola, y ajustarlos a la ecuación de la hipérbola que mejor los describe mediante mínimos cuadrados. Los parámetros que caracterizan el elemento son la frecuencia de captura, los descriptores de la hipérbola aproximada (alfa, beta, gamma, error), el número de reverberaciones de la señal, la anchura media de las reverberaciones y la distancia media entre las reverberaciones. Se ha realizado un programa que realiza todas las tareas de procesamiento automáticamente y que permite el tratamiento de todas las imágenes de manera repetitiva, fiable y rápida.
- **Caracterización del activo.** Se ha probado la viabilidad de la clasificación mediante métodos estadísticos. Los resultados de la clasificación son bastante buenos, en torno al 80-90 % para las frecuencias menores (250 y 500 MHz) en el caso de las tuberías con y sin capa de arena. La misma señal electromagnética en suelos diferentes ocasiona diferentes respuestas ya que el comportamiento y la amplitud de la señal reflejada se ve alterada.
- **Manejo del sistema por personal sin conocimiento elevado en geofísica o tratamiento de señal.** Permite que personal sin formación especializada de geofísico o tratamiento de señal pueda utilizar el aparato, dado que es el propio sistema el que realiza automáticamente el procesamiento de los datos y muestra al usuario los elementos identificados en el subsuelo y su ubicación.
- **No se ha apreciado ningún cambio en la respuesta de la señal electromagnética recibida por el georadar que haya podido ser alterada por campos eléctricos o magnéticos generados por activos soterrados eléctricos, como manojos de cables. Su presencia no ha influido en la correcta detección de elementos.**

En definitiva, a partir de una imagen difusa construida por un conjunto de ondas electromagnéticas emitidas sobre el subsuelo, se ha conseguido:

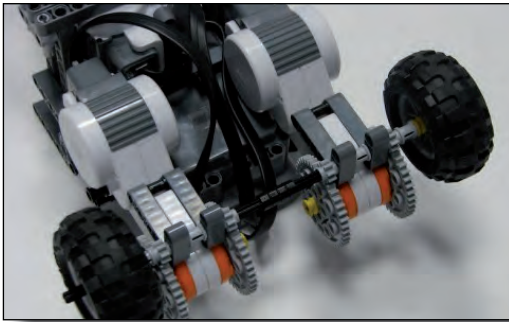
1. Mejorar la imagen para poder visualizar discontinuidades y alteraciones en su propagación que descubran la presencia de activos, minimizando el efecto de atenuación de la señal, sobre todo con la frecuencia y ruidos;
2. Localizar automáticamente los activos soterrados, que se manifiestan en la generación de una hipérbola de difracción en las ondas electromagnéticas recibidas;

3. Clasificar cada activo mediante la extracción de un vector de características y aplicación de la distancia de Mahalanobis en una de las 3 clases disponibles, con notable éxito.

REFERENCIAS

- [1] Al- Nuaimy W, Huang Y, Nakhkash, M, et al. "Automatic detection of buried utilities and solid objects with GPR using neural networks and pattern recognition", *Journal of Applied Geophysics*, 2000. Vol. 43, p. 157-165.
- [2] Andina D. *Computational Intelligence*. 1st edition. Springer. Febrero 2007. ISBN: 978-0387-37450-5.
- [3] Bishop C. M. *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer. 2006. Capítulo 12. ISBN: 978-0387-31073-2.
- [4] Brooks J, Van Kempen L, and Sahli H. "A Primary Study in Adaptive Reduction and Buried Minelike Target Enhancement From GPR Data," *Proc. SPIE, Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets*. Agosto 2000. Vol. 4038, p. 1138-1192, Orlando, Florida, USA.
- [5] Capineri L, Grande P, Temple J. A. G. "Advanced image-processing technique for real-time interpretation of ground-penetrating radar images." *International Journal of Imaging Systems and Technology*. 1998. Vol. 9, Issue 1, p. 51-59.
- [6] Cortes C, Vapnik V. "Support-Vector Networks", *Machine Learning*, 1995. Vol. 20, 1995. p. 273 - 297.
- [7] Jolliffe I.T. *Principal Component Analysis*. 2nd ed. Springer, 2002. ISBN: 978-0-387-95442-4.
- [8] Lázaro Salinas R. "*Prospección del subsuelo mediante ondas radar. Fundamentos y principales aplicaciones en Ingeniería Geológica*." Director: Albert Casas. Departamento de Geoquímica, Petrología y prospección Geológica, universidad de Barcelona, 1995.
- [9] Lighthart E. "*Landmine detection 3D GPR Imaging*". Graduation project IRCTR-A-022-03, October 2003. International Research Centre of Telecommunications-transmission and Radar. Faculty of Electrical Engineering, mathematics and Computer Science. Delf University of Technology. Netherlands.
- [10] Orlando L, Soldovierib F. "Two different approaches for georadar data processing: A case study in archaeological prospecting". *Journal of Applied Geophysics*. Marzo 2008. Vol. 64, Issues 1-2, p. 1-13.
- [11] Paik, Joonki, Lee, Cheolha, Abidi, Mongi. "Image processing – based mine detection techniques using multiple sensors: a review". *Subsurface Sensing Technologies and Applications: an international journal*. July 2002. Vol. 3, nº 3, p. 153-202.
- [12] Pajares G, de la Cruz J M. *Visión por computador*. RA-MA Editorial, 2001, ISBN: 84-7897-472-5.
- [13] Sytnik O. V., Gorohovatsky A. V. "Signal processing algorithms in identification of subsurface objects." *Radioelectronics and Communications Systems*. 2007. Vol. 50, Number 10, p. 557-563.

Los motores eléctricos de tracción ferroviaria. Características y técnicas de mantenimiento del sistema eléctrico



Marcelo Pérez-Alonso*
Daniel Moríñigo-Sotelo**
Óscar Duque-Pérez**

Dr. Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial

* INTEGRIA- RENFE. Dirección de Servicios de Ingeniería. Calle Antonio Cabezón, s/n - 28034 Madrid. Tfno: +34 913 009807. marcelop@renfe.es

** UNIVERSIDAD DE VALLADOLID. Escuela de Ingenierías Industriales. Dpto de Ingeniería Eléctrica. Paseo del Cauce, s/n - 47011 Valladolid. Tfno: +34 983 184407. morinigo@eis.uva.es; duque@eis.uva.es.

Recibido: 01/10/2010 • Aceptado: 05/05/2011

Railway traction electric motors. Characteristics and techniques of electric system maintenance

ABSTRACT

• Due to their operating characteristics, continuous speed control and their reversible performance, traction motors can be considered a specific class among industrial electric motors. They are subjected to significant thermal, electrical, mechanical and environmental stresses and the increasing demand for security and reliability and the reduction of costs demand specific manufacturing requirements somehow different from other electric motors. Moreover, the development of high speed railways around the world increases the requirements on the electrical machine.

These new requirements on the design and manufacturing of traction motors have a significant impact on their maintenance and repairing. Consequently, this paper deals with the requirements that a modern repair workshop must fulfill, stressing the need for personnel specialization and for the use of the most advanced technology in maintenance and repairing. Due to space limitation, the paper describes with more detail the issues related to the insulation material, since it is the motor component most stressed in operating conditions and accounts for a great percentage of the total number of faults.

• **Key words:** Maintenance, traction motors, electric motors.

RESUMEN

Por sus características de explotación, su control continuo de velocidad y su funcionamiento reversible como motor y generador, y por el hecho de funcionar “embarcados” y prácticamente a la intemperie, los motores de tracción pueden considerarse una clase específica dentro del conjunto de los motores eléctricos industriales.

El motor de tracción, durante su explotación, se encuentra sometido a esfuerzos térmicos, mecánicos, eléctricos y ambientales elevados que, unidos al incremento en las exigencias de fiabilidad y seguridad y a requerimientos de coste optimizado, conforman un conjunto de circunstancias que hacen que la construcción del motor de tracción obedezca a criterios diferentes, hasta cierto punto, de los utilizados en otros motores industriales. Es más, la gran relevancia que en estos últimos años ha adquirido la denominada “alta velocidad” ha supuesto nuevas exigencias.

En consecuencia, las demandas sobre el diseño y la fabricación se

transmiten sobre el mantenimiento y reparación de los motores. En este artículo se trata sobre las técnicas, requisitos y procesos que debe tener un taller moderno ocupado en reparar y mantener este tipo de motores, incidiendo en la necesidad de especialización de su personal y en la aplicación de las técnicas de reparación y mantenimiento más avanzadas. Por razones de espacio se ha dado importancia a los procesos de ensayo del sistema aislante, por ser éste el elemento del motor que soporta los mayores esfuerzos y que se refleja en el mayor porcentaje de averías.

Palabras clave: Motor de tracción, mantenimiento, motores eléctricos.

1. LOS MOTORES DE TRACCIÓN. CARACTERÍSTICAS

Tradicionalmente el motor que se utilizaba en tracción era el motor de corriente continua debido a la facilidad del control de velocidad y a su elevado par de arranque. En un principio se utilizaban equipos

“convencionales” a base de contactores, resistencias, etc. Posteriormente, con el avance de la electrónica de potencia, el desarrollo de semiconductores de mejores características y las nuevas técnicas de control, el motor de corriente continua se ha ido sustituyendo por motores de inducción con el rotor de jaula (reduciendo peso, mantenimiento y costes al carecer de colector y escobillas), con una etapa histórica intermedia en que se utilizaban convertidores *chopper* conjuntamente con los motores de continua y el uso de motores síncronos, particularmente en Francia y España en la serie 100 de AVE. Aunque todavía quedan en funcionamiento un número considerable de motores de corriente continua, actualmente en Europa prácticamente todo el nuevo material rodante ferroviario, tanto convencional (cercanías, mercancías y largas distancias) como de alta velocidad, porta motores de corriente alterna.

El motor de tracción precisa de un control continuo de velocidad, con condiciones variables de carga, y debe ser reversible, devolviendo energía a la red cuando se produce el frenado regenerativo (o bien utilizando un frenado reostático, consumiendo la energía generada). Esto exige equipos auxiliares de control y potencia importantes que interaccionan con el motor y que, a su vez, condicionan su funcionamiento y protección y que son susceptibles de averiarse. Por otra parte, el motor de tracción, como parte de los sistemas que embarcan los vehículos, debe tener un peso limitado y, especialmente, el menor volumen posible.

Por las condiciones específicas de funcionamiento y los esfuerzos a que se encuentran sometidos, los motores de tracción poseen unas características específicas que les diferencian del resto de motores. No obstante, cometeríamos un gran error si suponemos que el conjunto de motores de tracción es un conjunto homogéneo. Es más, su diseño y construcción ha cambiado mucho en los últimos 25 años, debido principalmente a:

- Exigencias de mayores velocidades. Incorporación de la alta velocidad.
- Diferentes formas de funcionamiento provocadas por la necesidad de mayor fiabilidad, confort y seguridad.
- Evolución de los materiales utilizados en los motores de tracción, particularmente en los aislamientos.
- Rápido desarrollo de la electrónica de control y potencia. Disponibilidad de semiconductores de potencia con mejores prestaciones.

En cuanto a la severidad de los esfuerzos a que se encuentran sometidos los motores de tracción (Tabla 1), en general, deben soportar mayores solicitaciones mecánicas, térmicas y ambientales que el resto de motores y, aunque las solicitaciones eléctricas no son muy elevadas (inferiores a los 3 kV), al estar accionados mediante convertidores estáticos, sufren los efectos de los elevados gradientes de tensión originados por la conmutación de los semiconductores de potencia. Además, debido a las altas frecuencias de conmutación, se producen ondas reflejadas que suponen la presencia de picos de tensión sobre el motor que pueden alcanzar tres y cuatro veces el valor de la tensión de salida

del convertidor. También habría que considerar el paso de corriente por los rodamientos debido a las elevadas tensiones en “modo común” que se producen con los convertidores, la mayor presencia de armónicos (mayores pérdidas y menor rendimiento) y las pulsaciones de par en el eje.

Estos esfuerzos inciden especialmente sobre la vida del aislamiento, manifestándose este elemento como el más débil del motor y, en consecuencia, el menos fiable. Aunque no existen datos contrastados sobre la distribución de averías en los motores de tracción, nuestra experiencia nos permite considerar que, actualmente en España, el porcentaje de averías del aislamiento en los motores de tracción asíncronos es del orden del 80% del total. Hay que tener en cuenta que el aislamiento se encuentra sometido a especiales requerimientos debidos a:

- Elevada relación cobre/aislamiento en los devanados del estator.
- Diseño para soportar un frecuente y elevado gradiente eléctrico (superior a 3 kV/mm), consecuencia del uso de motores accionados por convertidores electrónicos.
- Resistencia térmica elevada (tipo: H, 200 y superior).
- Buenas características mecánicas debido principalmente a la elevada vibración a que se encuentra sometido, transmitida desde el propio motor, otras máquinas montadas en el tren y vibraciones y choques transmitidos desde la vía.
- Buena resistencia a los agentes ambientales (diferencia de temperatura, agua, nieve, partículas metálicas, polvo, aceite, ambientes salinos, etc.).

Esfuerzos Motores	Térmicos (clase)	Mecánicos (ponderación)	Ambientales (ponderación)	Eléctricos
Baja Tensión	F, H	1	2	< 1 kV
Alta Tensión	F, H	2	1	100 kV
	H, 200	3	3	< 3 kV

Tabla 1: Clasificación de los esfuerzos a que se encuentran sometidos los motores de tracción

2. MANTENIMIENTO DE LOS MOTORES DE TRACCIÓN

El mantenimiento de los motores de tracción ferroviaria se caracteriza por la gran variedad de material existente, motores de corriente continua y de corriente alterna, con potencias que oscilan entre los 100 kW empleados en metros y tranvías a los 1,8 MW (máximos utilizados en locomotoras dedicadas al transporte de mercancías y con tensiones desde 0,5 kV hasta 2,6 kV c.a.), así como por la diversidad de tecnologías y materiales utilizados en su fabricación. La necesidad de conseguir una buena relación entre cobre/aislamiento demanda espiras y bobinas con varias capas

de aislamientos de última tecnología y una geometría muy ajustada, núcleos de chapas magnéticas de acero al silicio, rotores de barras con geometrías especiales y materiales de altas prestaciones, carcasas con mecánica de tolerancia muy precisa, rodamientos aislados de elevada calidad, etc.

En consecuencia, la reparación necesita en primer lugar disponer de documentación completa de los motores, de medios técnicos suficientes (instalaciones, aparataje y equipos de ensayo) y personal muy especializado, que asegure una buena reparación y ofrezca una garantía y confianza suficiente.

El equipo humano debe tener distintos grados de cualificación, desde operarios muy especializados (bobinadores, personal de pruebas) hasta personal auxiliar, pero, en general, la cualificación debe ser media con continuos cursos de formación para reciclaje, siendo el número de operarios función de las dimensiones del taller y de la carga de mantenimiento. Es necesario además contar con una sección de ingeniería de mantenimiento.

Las medidas de seguridad son las normales para el trabajo desarrollado. Hay que tener en cuenta que en distintos puntos se trabaja con tensiones que pueden llegar a los 10000 V y que el peso de los motores supera en muchos casos las 2 Tm. También se realizan ensayos dinámicos en los que pueden rodarse los motores a más de 4000 rpm.

El mantenimiento puede realizarse todo en un mismo taller o efectuarse subcontrataciones de trabajos específicos. Es muy común que un taller gestione todo el mantenimiento del motor y utilice otros talleres de menores dimensiones para trabajos que no requieren excesiva especialización (por ejemplo desguaces de bobinas) o que demande trabajos específicos (por ejemplo fabricación de bobinas en forma de kit). Esta cuestión, como las anteriores es muy variable y no pueden establecerse pautas generales.

Además, las empresas de reparación deben disponer de un sistema de control de calidad y una oficina técnica que documente las reparaciones, interprete los diagnósticos y haga seguimiento de los motores para obtener una retroalimentación de la información del comportamiento del motor durante su explotación.

Con las limitaciones de espacio obvias, vamos a continuación a señalar aquellos procesos y ensayos que se consideran más importantes en la reparación de los motores eléctricos de tracción.

3. TAREAS PREVIAS A LA REPARACIÓN. LIMPIEZA Y DIAGNOSIS

Cuando el motor llega al taller de reparación debe realizarse una completa diagnosis del estado del mismo. Aunque esta es una tarea generalmente exigida por los clientes, debe de tenerse en cuenta que no sólo ha de servir para realizar un presupuesto del coste de la reparación, sino para recabar datos de la explotación del motor, eliminar puntos débiles y mejorar la reparación.

El motor de tracción, como consecuencia de las condiciones de explotación, suele llegar a los talleres muy sucio (es frecuente la presencia de aceite en la zona de cabezas de bobinas). La suciedad afecta de forma notable al funcionamiento del motor por lo que es imprescindible conseguir una muy buena limpieza del sistema aislante.

La limpieza de la parte activa se realiza mediante lavado de agua con detergente, en un proceso similar al expuesto en la Tabla 2. Deben utilizarse agentes neutros (probados y homologados), cuidando la presión y temperatura de los líquidos aplicados. Si se hace de otra forma, es muy probable que a la vez que se elimina la suciedad también se elimine parte del aislamiento. Como primer paso se recomienda un soplado del motor con aire comprimido, siempre que no haya presencia de aceite, enfocado principalmente a limpiar los conductos de ventilación del motor.

Si la limpieza con detergente y el enjuague posterior con agua no son suficientes, debe aplicarse un disolvente utilizando pincel, rociando, etc. (máximo 10 minutos). A continuación debe secarse con trapo o efectuarse un lavado con detergente. Sólo deben utilizarse disolventes libres de halógenos y tener precaución de que los disolventes utilizados no sean incompatibles con la resina aislante utilizada, particularmente en el caso de aplicar silicona.

3.1. REVISIÓN DEL ESTADO DEL AISLAMIENTO

Durante la reparación del motor, en distintos puntos del proceso, es necesario evaluar el estado del aislamiento, comprobando que se encuentra en buenas condiciones y que puede realizarse la siguiente secuencia de tareas. Así se pueden hacer ensayos de aislamiento en la recepción del motor, después de su limpieza, para tomar decisiones de las operaciones que se van a realizar (ninguna, reimpregnación, rebobinado, etc), al recepcionar bobinas nuevas, después del montaje de las bobinas en ranuras, antes de la impregnación

Procedimiento	Temperatura (°C)	Sobrepresión (bar)	Tiempo (min)
Soplar con aire comprimido	-	Máximo 5 bares	-
Prelavado con agua o agua y detergente, disolver la suciedad y eliminarla	80 -90	0,5 - 5	5
Lavado principal con agua y detergente	80 -90	0,5 - 5	5
Enjuague con agua o con agua y aditivos anticorrosivos	80 -90	0,5 - 5	5
Secado en horno o autoclave	110	-	24 horas
	80	Vacío 1 mbar »	3 - 6 horas

Tabla 2: Proceso de limpieza de un motor de tracción.

para comprobar su limpieza y eliminación de la humedad, después de la impregnación, después del conexionado final y después de las pruebas dinámicas como control de calidad, etc.

Podemos distinguir entre dos tipos de pruebas de acuerdo con su propósito:

- Verificación del aislamiento a masa.
- Verificación del aislamiento entre espiras, devanados o fases.

3.2. ANÁLISIS DEL AISLAMIENTO A MASA

Los métodos de análisis del aislamiento en máquinas eléctricas superan ampliamente la decena. Entre ellos deben utilizarse aquellos que mejores resultados proporcionen dentro de la simplicidad de su aplicación y garantía de resultados, teniendo en cuenta que no todos deben realizarse de forma conjunta cada vez que se evalúa un aspecto del aislamiento. Resultan indispensables la medida de resistencia a masa, el índice de polarización (IP) y la capacidad del aislamiento, además de las pruebas denominadas de sobretensión (HIPOT, *High POTential*); junto a ellas es muy recomendable realizar medidas de la tangente de delta (o factor de disipación).

Por razones de espacio, vamos a tratar superficialmente algunas cuestiones de interés de estos ensayos y sus características de aplicación a los motores de tracción. Todas estas pruebas tienen además numerosas variantes que pueden ser consultadas en la literatura especializada.

3.2.1. Resistencia de aislamiento

Consiste en medir o calcular el valor de la resistencia de aislamiento a una tensión determinada. La medida debe realizarse transcurridos 30 ó, más comúnmente, 60 s después aplicada la tensión continua y siempre por encima del punto de rocío, pues el valor depende de la humedad, especialmente en aislamientos antiguos con características higroscópicas. La información que proporciona este ensayo está referida especialmente al estado del aislamiento en cuanto a la contaminación superficial (humedad y suciedad). Hay que procurar elegir un sitio adecuado del taller para realizar estos ensayos, lo más alejado posible de zonas de humedad (zona de lavado) y donde la temperatura permanezca aproximadamente constante.

El último estándar de importancia sobre este tema es el IEEE Std 43-2000 (R 2006). En este documento se hace una revisión de valores de aplicación y resultados que deben obtenerse con los aislamientos modernos como es el caso de los motores de tracción. Así para el rango de tensiones nominales utilizadas en los motores de tracción, de acuerdo con el estándar anterior se recomiendan tensiones de prueba de 500 ó 1000 V (inferiores a las nominales del motor) y valores mínimos de la resistencia de aislamiento para aislamientos nuevos o recién reparados de 200 MegaOhmios.

La experiencia adquirida con los motores de tracción nos indica que, después de un proceso de reparación, la resistencia de aislamiento de los motores suele superar ampliamente el

valor de 1 GigaOhmios, manteniéndose para los motores asíncronos valores superiores a los 100 MOhmios durante la aplicación, valores que pueden reducirse hasta pocas decenas de MegaOhmios, si están sucios, y valores inferiores, si están húmedos (épocas de lluvia y/o nieve). Los fabricantes aportan valores de evaluación durante el mantenimiento, pero desgraciadamente suelen ser muy conservadores y, por lo tanto, poco prácticos si se desean utilizar técnicas de monitorizado del estado basadas en tendencias.

3.2.2. Índice de polarización e Índice de absorción

Se define el índice de polarización IP como la relación entre la resistencia de aislamiento medida a 1 minuto y a 10 minutos después de aplicar la tensión continua de prueba.

$$IP = \frac{R_{1min}}{R_{10min}} = \frac{I_{10min}}{I_{1min}} \approx \frac{I_{cond} + I_{abs}}{I_{cond}} = 1 + \frac{I_{abs}}{I_{cond}}$$

Este valor informa del estado de humedad y limpieza de la máquina, basado en la suposición de que, transcurrido un cierto tiempo desde el comienzo del ensayo, la corriente de absorción se habrá anulado. Un valor bajo indicará que existe una corriente alta de conducción, originada por suciedad y humedad (Figura 1).

La resistencia de aislamiento normalmente se incrementará rápidamente cuando se aplica la tensión y después gradualmente tenderá a un valor constante cuando el tiempo de ensayo se prolonga. Los aislamientos más modernos, tal como los actualmente utilizados en los motores de tracción, llegan a un valor estacionario de la resistencia de aislamiento en 4 minutos o menos. Así, se utiliza en estos casos una variante del IP que calcula la relación entre las resistencias de aislamiento a 1 minuto y 30 s, después de iniciar el ensayo. Este valor es denominado “índice de absorción” (IA).

$$IA = \frac{R_{30s}}{R_{1min}}$$

El IP de un aislamiento es un valor adimensional que permitirá hacer comparaciones sobre el estado del aislamiento

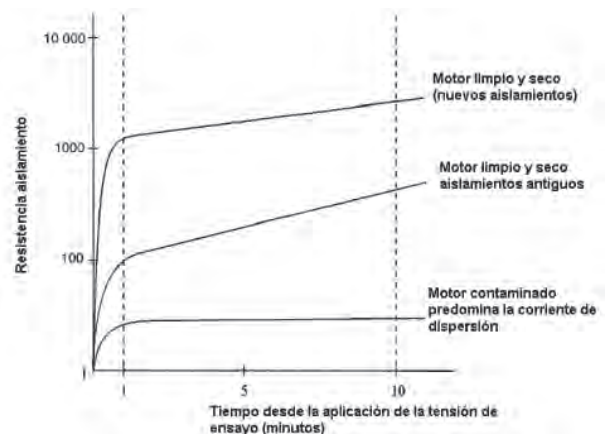


Figura 1: Curvas de resistencia de aislamiento – tiempo para distintos estados del aislamiento

de máquinas de distintas características (tamaño, potencias, tensiones). Para los motores de tracción (clase térmica H, 200), de acuerdo con la IEC 60085.01, se recomienda que sea superior a 2. Un valor inferior a 1 indica un aislamiento pobre, en mal estado. No obstante, si la resistencia de aislamiento es mayor que $5 \text{ G}\Omega$, el valor calculado del IP no es significativo y, por lo tanto, no será tenido en cuenta.

Una alternativa eficaz a estos índices es analizar la curva de crecimiento de la resistencia con el tiempo. Si se observan desviaciones importantes respecto a las curvas teóricas o a las de otros motores similares, tendremos un síntoma de problemas en el aislamiento.

3.2.3. Capacidad

La medida de la capacidad puede proporcionarnos información de problemas tales como el deterioro térmico o saturación del aislamiento por humedad.

Los valores de la capacidad son característicos para cada motor y son función del tipo de aislamiento utilizado y de la geometría del motor. La dispersión del valor de capacidad obtenido en un motor de tracción sobre el de referencia de su serie es un síntoma claro de problemas en el aislamiento. Además, el valor de la capacidad es un parámetro significativo para conocer el estado en que se encuentra la impregnación del motor dentro de un proceso VPI ("Vacuum Pressure Impregnation") del que se hablará más adelante. El dispositivo de medida de la capacidad debe tener una gran precisión para obtener medidas significativas (inferior al 0,1 %).

Aunque ninguna norma facilita valores de referencia, nuestra propia experiencia con los motores de tracción nos indica que un cambio apreciable en el valor de la capacidad, del orden del 10 %, es síntoma de que el motor puede tener problemas en el aislamiento y aconseja su inmediata revisión.

3.2.4. Ensayos de sobretensión, HIPOT (*High POTential*)

Estos ensayos proporcionan información de la rigidez dieléctrica del sistema aislante. Consisten en aplicar una tensión superior a la nominal del bobinado de la máquina. Si el aislamiento soporta esa aplicación durante un cierto tiempo y no se produce una circulación excesivamente alta de corriente de dispersión, se asume que será capaz de soportar sin peligro la tensión normal de funcionamiento.

Estos ensayos se aplican obligatoriamente en el caso de máquinas recién fabricadas o en las que se ha reparado el bobinado y en todas las nuevas bobinas, si se va a proceder a un rebobinado del estator. En cualquier caso, son ensayos cuyo resultado es "pasa/no pasa" y que, en caso de resultado satisfactorio, proporcionan alguna garantía de que el muro aislante puede soportar con seguridad los esfuerzos dieléctricos que se producen bajo la tensión normal de trabajo de la máquina.

Existe una fuerte polémica entre los partidarios y no partidarios de estos ensayos; en todo caso, su aplicación o no dependerá de:

- Criticidad de la máquina.
- Existencia de repuestos y disponibilidad de tiempo para la reparación.
- Política de mantenimiento seguida por el taller de reparación y el usuario del motor.

Aunque por regla general un aislamiento en buen estado no va a ser deteriorado con este ensayo, no se debe abusar de este tipo de pruebas y de ninguna manera deben realizarse más de dos ensayos HIPOT durante el proceso de reparación. En operaciones programadas de mantenimiento no deben hacerse estos ensayos en intervalos inferiores a tres años y, como regla general, este ensayo se realizará siempre después de un ensayo satisfactorio de resistencia de aislamiento.

La distribución del esfuerzo dieléctrico dentro del aislante es diferente si el ensayo se realiza con tensión continua (la distribución es proporcional a la resistividad de cada capa aislante) o alterna (la distribución es función de la capacidad de cada capa). Por ello, y dado que la prueba con tensión alterna es más similar al funcionamiento normal del motor, es preferible hacer estos ensayos con tensión alterna.

Las normas IEC 60034 y NEMA MG1 definen valores de la tensión a aplicar durante estos ensayos y que de forma resumida para los ensayos HIPOT en corriente alterna se muestran en la Tabla 3.

Máquinas y bobinas nuevas	2E + 1 kV E es el valor eficaz de la tensión entre fases
Máquinas en activo o en mantenimiento. Devanados secos y limpios	0.6 a 0.8 * (2E + 1 kV), Suele considerarse 0,75 (IEC 60034-1)

Tabla 3: Valores de la tensión para ensayos HIPOT

La norma EN 60349-2 requiere la realización de un ensayo dieléctrico después de la finalización de los ensayos individuales a los que se somete el motor al final del proceso de fabricación. La tensión de ensayo con corriente alterna será la mayor de:

$$2 U_{dc} + 1000, \quad 2 \frac{U_{rp}}{\sqrt{2}} + 1000, \quad \frac{U_{rp6}}{\sqrt{2}} + 1000$$

Siendo:

U_{dc} - tensión media más alta respecto a tierra que puede aplicarse a la conexión con la corriente continua cuando el sistema de contacto está en su tensión máxima y la máquina está funcionando como motor (generalmente el valor máximo posible de la tensión del circuito intermedio del convertidor de alimentación).

U_{rp} - tensión de cresta repetitiva máxima respecto a tierra que puede aplicarse a los devanados de la máquina con tensión de catenaria máxima y la máquina funcionando como motor.

U_{rpb} - Tensión de crestas repetitivas máxima con respecto a tierra que puede aparecer en el devanado cuando la máquina está frenando.

3.2.5. Ensayo de saltos de tensión

El ensayo de saltos de tensión puede considerarse una variante de los ensayos anteriores que facilitan información numérica y gráfica sobre el estado del aislamiento del motor. Consiste en varias pruebas sucesivas de la resistencia de aislamiento, aplicando en cada paso un nivel superior de la tensión. Normalmente se aplican cinco pasos con valores de tensión de 300 a 1500 V, de 500 a 1500 V o de 500 a 2500 V según los valores de la tensión nominal de alimentación del motor.

Aunque el valor de la resistencia de aislamiento puede sufrir un pequeño decrecimiento con el aumento de la tensión, si el aislamiento está en buenas condiciones debe obtenerse prácticamente la misma medida de aislamiento hasta llegar al valor máximo nominal de la tensión. En la Figura 2 se muestran los resultados de un ensayo de saltos de tensión, en un motor de tracción con el aislamiento en buen estado.

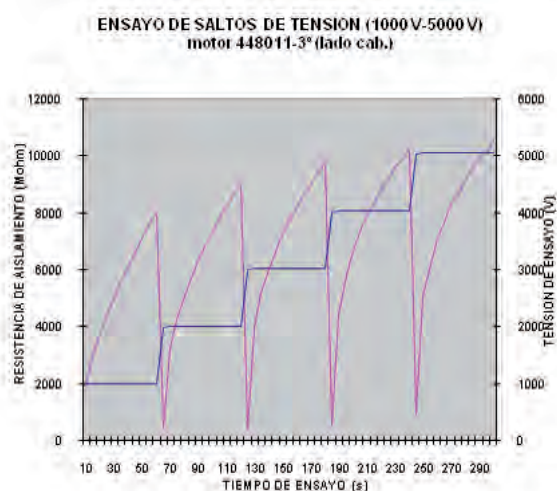


Figura 2: Ensayo de Saltos de Tensión de un motor de tracción eléctrico con el aislamiento en buen estado: el valor del aislamiento aumenta al subir la tensión

Si sucede que con un aumento de la tensión nominal se produce una disminución de la resistencia de aislamiento, puede ser síntoma de problemas en el aislamiento que pueden ser debidos a fracturas de aislamiento agravados por la presencia de suciedad o humedad.

El cambio en el valor de la resistencia es más pronunciado a valores de tensión considerablemente superiores de la tensión nominal.

3.2.6. Tangente de delta

Los ensayos de tangente de delta, también denominados en la terminología anglosajona *factor de dispersión*, se

realizan aplicando una tensión alterna y han venido mostrando durante años ser herramientas muy valiosas para determinar tanto la calidad en la fabricación de los devanados como su estado en máquinas ya en funcionamiento.

La tangente de delta es una medida de las pérdidas eléctricas en el aislante. En un aislamiento perfecto su valor no se incrementará conforme aumenta la tensión aplicada; sin embargo, en el muro aislante del devanado estático o entre el aislante y el hierro, pueden estar presentes pequeños huecos de aire. Cuando se aplica una tensión suficientemente alta al devanado, en estos huecos se pueden presentar descargas parciales que dan lugar al incremento de las pérdidas en el devanado. Su evaluación representa las pérdidas medias sobre el objeto de ensayo: esto no se corresponde con la peor zona del aislamiento, de modo que una bobina puntualmente en mal estado puede estar enmascarada por un alto número de bobinas en buen estado. El incremento de la tangente de delta con la tensión es función del contenido global en huecos del sistema aislante, grado de compacidad del aislamiento, composición del aglomerante y estado del tratamiento superficial. El análisis de los resultados obtenidos en este ensayo debe hacerse comparando con otros motores de la misma serie o siguiendo la evolución de un mismo motor.

3.3. AISLAMIENTO ENTRE ESPIRAS (DEVANADOS O FASES)

Los ensayos con tensión continua y los de sobretensión pueden detectar fallos existentes o incipientes a tierra, pero no pueden indicar el estado en que se encuentra el aislamiento entre espiras. Para este objetivo se utilizan los ensayos de ondas de choque inicialmente utilizados para el estudio del aislamiento entre espiras bajo condiciones de conmutación o tensiones transitorias. Con la introducción de los convertidores de frecuencia, debido a los sobreesfuerzos a que se ve afectado el aislamiento entre espiras, estos ensayos están cobrando cada vez mayor importancia, primero en la fabricación de bobinas como garantía de su calidad, y actualmente también en tareas de mantenimiento, principalmente en la evaluación y peritación del estado del motor.

Este ensayo es análogo al HIPOT, en el sentido de que aplica una alta tensión, en este caso al aislamiento entre espiras (o fases), y se observa si se produce un fallo. Es un test que puede resultar destructivo, del tipo “pasa – no pasa”. Su aplicación debe ser cuidadosa y no abusiva, pues en el caso de que el aislamiento esté debilitado, puede ocasionar su destrucción. El ensayo consiste en la aplicación de impulsos de alta tensión con un tiempo de subida de aproximadamente 0,1 a 0,2 microsegundos y de amplitud variable, comparándose circuitos que en teoría deben ser idénticos (normalmente, bobinas o grupos de bobinas idénticas o las tres fases del estator del motor). Si los devanados de las fases/circuitos bajo ensayo son iguales, las ondas reflejadas serán idénticas. Si uno de los circuitos tiene un fallo o defecto de aislamiento o constitución, su modelo no será el mismo que el del devanado en buen estado (Figura

3). Generalmente las espiras cortocircuitadas darán lugar a diferencias bastante pequeñas en la amplitud de la forma de onda, necesiándose un operador experimentado para distinguir la falta. Los defectos más graves, como pueden ser los cortocircuitos entre fases, tienden a provocar alteraciones mucho más acusadas de las formas de onda. Los fabricantes de equipos de ensayo proporcionan información relacionada con las formas habituales de discrepancias en las ondas y la naturaleza de las faltas asociadas.

Existe una nueva generación de equipos de prueba para ensayos de sobretensión. Estos equipos liberan en parte de la labor de interpretación del operador, para lo cual se produce un almacenamiento de datos y su posterior análisis en PC [IEEE Std 522-2004]. Como valores de aceptación se recomienda, para el ensayo de bobinas individuales durante el proceso de fabricación, un tiempo de subida de la sobretensión de 100 ns y una magnitud máxima de 3,5 veces la tensión nominal en fase. Para los ensayos de mantenimiento el tiempo de subida sería el mismo, pero el valor de la tensión inferior al antes indicado.

La norma IEC 60034-15 presenta valores más exigentes para las tensiones de prueba y además, los fabricantes de los equipos, indican recomendaciones al respecto. Como norma general, en bobinas debe utilizarse un valor mínimo de 500 V por espira.

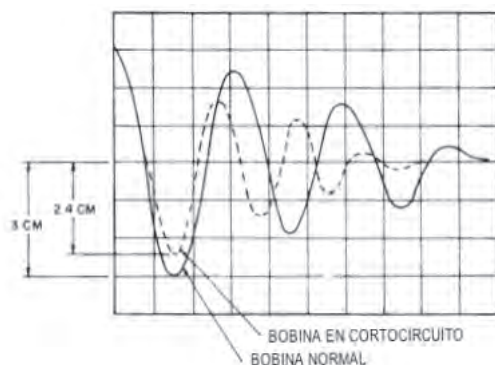


Figura 3: Ensayo de ondas de choque y formas de onda de una bobina en cortocircuito y una bobina normal, inducidas en el ensayo de ondas de choque

4. REBOBINADO DEL ESTATOR

Los motores de tracción utilizan bobinas preformadas con un sistema de impregnación VPI global. Con cierta frecuencia, la reparación del motor necesitará la reconstrucción total del devanado del estator (tal como se ha visto, en los motores asíncronos de tracción el elemento más débil es el aislamiento del estator).

La construcción de las bobinas es un trabajo delicado y preciso que requiere el uso de materiales de acuerdo con el diseño original del motor o con las especificaciones de ingeniería, respetando fielmente su geometría y dimensiones. Puede realizarse en talleres externos especializados, mientras que su montaje sobre el motor puede realizarse por el taller que las construye o por él que realiza el proceso general de reparación. Los talleres que fabrican las bobinas deben estar certificados para realizar este trabajo y las secciones de bobinado y montaje de bobinas deben estar ubicadas en zonas aisladas, limpias e incluso presurizadas para evitar la contaminación de los materiales aislantes.

Al final de su construcción, todas deben pasar por ciertos controles dimensionales, que aseguren su montaje en las ranuras con el mínimo esfuerzo, sin sufrir deterioro mecánico que puede dañar el aislamiento, y por pruebas dieléctricas (HIPOT y/o ondas de choque).

Actualmente los devanados estatóricos utilizan, con sus variantes, sistemas aislantes basados en polimida, aunque con clara tendencia a utilizar materiales con protección anticorona y principalmente cintas de mica junto, en ocasiones, con cintas de polimida para el aislamiento de pared principal. Las bobinas llevan una cinta exterior de fibra de vidrio que aporta protección mecánica, particularmente para evitar daños durante su montaje. Al final todo el bobinado del estator, después de que ha sido montado y conectado es sometido a un tratamiento VPI con aporte de resinas con la que se rellenarán los posibles huecos existentes en el aislamiento y que darán consistencia al aislamiento y facilitarán la conductividad térmica para evacuar el calor en ellos generado durante el funcionamiento.

5. IMPREGNACIÓN DE LOS MOTORES DE TRACCIÓN. SISTEMA VPI GLOBAL

Debido a las altas prestaciones demandadas, actualmente los motores de tracción se caracterizan por utilizar como único método de impregnación el sistema VPI global. Todos los talleres dedicados a su reparación deben poseer una sección de impregnación VPI que es, junto al banco de ensayos, posiblemente la inversión en equipos más importante que deben acometer.

El procedimiento VPI está totalmente establecido y probado en los motores para proporcionar un alto nivel de fiabilidad, siempre que los materiales aislantes sean seleccionados cuidadosamente y sea aplicado correctamente. Son cinco los ciclos básicos a que está sometido el motor durante el proceso de impregnación: presecado, vacío seco, vacío húmedo, presión y curado.

La impregnación VPI para que sea efectiva debe hacerse de forma muy precisa. Posibles causas de una impregnación deficiente son:

- Insuficiente aislamiento principal que provoca arrugas en las cintas aislantes y favorece la creación de huecos difíciles de rellenar por la resina.
- Resina de impregnación inadecuada. Mala viscosidad o contaminación química.
- Resina utilizada en excesivos ciclos de impregnación y no restaurada para recuperar sus propiedades químicas.
- Incompatibilidad entre la resina y el resto del sistema aislante.
- Ciclo de impregnación no correcto (inadecuado precalentamiento del motor, aplicación de tiempos, temperaturas o presiones incorrectos).

Para conseguir una impregnación VPI adecuada deben seguirse diversos controles, entre ellos:

- Control sistemático de la viscosidad de la resina.
- Control de tiempos, presiones y temperaturas.
- Monitorización de la capacidad del aislamiento que permite conocer cuándo se ha completado el relleno de los huecos del aislamiento con resina. La capacidad debe incrementarse con el tiempo hasta que la impregnación se ha completado. Si realizamos una gráfica capacidad-tiempo, cuando la capacidad permanezca constante sabremos que hemos terminado el proceso de impregnación.

6. EQUILIBRADO DEL MOTOR

La elevada precisión dimensional exigida a los motores de tracción junto con los esfuerzos mecánicos a que se encuentran sometidos en su funcionamiento (vibraciones, arranques, paradas, cambios continuos de velocidad, etc.) precisa un exigente equilibrado del rotor. De acuerdo con la norma ISO 1940, actualmente los motores de tracción requieren calidades de equilibrado G 2.5 y G 1.

7. CONCLUSIONES

Los motores de tracción están sometidos a fuertes sollicitaciones y a una continua evolución, de acuerdo con la orientación del servicio ferroviario. Todo ello se traduce en la necesidad de utilizar cada vez materiales más especializados para su fabricación, particularmente en el sistema aislante, así como la aplicación de las técnicas más novedosas para su análisis reparación y mantenimiento.

Los talleres de reparación deben contar con unas instalaciones adecuadas, con secciones de limpieza y bobinado cada vez más automatizados, aptas para los requerimientos exigidos así como con equipos avanzados de impregnación VPI, equilibrado y ensayo, siempre en concordancia con las reglamentaciones ambientales y de seguridad. Los trabajos y equipos a utilizar precisan, además

de personal especializado, en continua formación para su adaptación a los nuevos desarrollos de los motores, materiales para la realización de los ensayos. La diversificación del material, la amplitud de la documentación manejada, la continua y necesaria actualización y mejora así como la necesidad de interpretar resultados de ensayos cada vez más especializados, exigen la presencia de un equipo de ingeniería capacitado.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Brütsch R, Allison J, Thaler T. "Factors Determining Cost and Quality of the Electrical Insulation in the VPI-Process". En: *IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Montreal 16-19 de Junio de 1996)*, 1996. p.259-262
- CEI. *Evaluation and qualification of electrical insulation systems used in rotating electrical machines when fed from voltage converters* IEC 60034-18-41. Ginebra: CEI, 2006
- Drapebr RE, Moore J, Rehder RH. "Insulation System Evaluation for Rotating Machinery" *IEEE Electrical Insulation Magazine*. Julio/Agosto 1995. Vol.11-4 p.19-25
- Duque-Pérez O, Pérez-Alonso M. *Motores de Inducción. Técnicas de Mantenimiento Predictivo*, 1ª Edición. Badajoz: Editorial @ becedario, 2005. ISBN: 84-934437-8-6
- Espolita-Carreño L. "¿Qué mantenimiento debemos hacer?" *DYNA Ingeniería e Industria*. Enero-Febrero 2000. Vol.75-1 p.49-54
- Hill RJ. "Electric Railway Traction. Part 2. Traction Drives With Three-Phase Induction Motors". *Power Engineering Journal*. Junio 1994. Vol.8-3 p.143-152
- Hota H, Maeda T. "Improvement of Insulation Test for Traction Motors" *Quarterly Report of RTRI*. Marzo 1997, Vol.38 p.31
- IEEE Power Engineering Society. *Guide for Testing Turn-to-Turn Insulation on Form-Wound Stator Coils for AC Rotating Electric Machines*. IEEE 522-2004. Nueva York: IEEE, 2006
- IEEE Power Engineering Society *IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*. IEEE Std 43-2000 (R 2006). Nueva York: IEEE, 2006
- Katz M, Theis RJ. "New High Temperature Polyimide Insulation for Partial Discharge Resistance in Harsh Environments" *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Julio/Agosto 1997 Vol.13, p.24-30
- Kaufhold M, Schäfer K, Bauer K et al. "Interface Phenomena in Stator Winding Insulation - Challenges in Design, Diagnosis and Service Experience" *IEEE Electrical Insulation Magazine* Marzo/Abril 2002. Vol.18 p.27-36
- Pavón-Rodríguez M A. "La gestión del mantenimiento. Un valor añadido" *DYNA Ingeniería e Industria*. Mayo 2007. Vol.82-4 p.27-30
- Stiffler W, Bell S. "Development of a 40-Year Design Life Severe Duty Motor" *IEEE Transactions on Industry Applications*, Septiembre/Octubre 1989. Vol.25-5 p.125-126
- Stone G, Boulter EA, Culbert I et al. *Electrical Insulation for Rotating Machines. Testing, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*. 1ª Edición. New York: Wiley-IEEE Press, 2004. 392p. ISBN: 0-471-44506-1
- Toliyat H, Kliman GB. *Handbook of Electric Motors*. 2ª Edición. Nueva York: Marcel Dekker, 2004, 850p. ISBN: 0-8247-4105-6

Modelo de diseño ergonómico para puestos de trabajo en pymes.

Caso de estudio en Barranquilla, Colombia



Ángel León González-Ariza
Miguel Ángel Ruiz-Bacca

Dr. de Ingeniería Industrial
Diseñador Industrial

UNIVERSIDAD DEL NORTE, Km. 5 vía Puerto - Barranquilla (Colombia).
Tfno: +575 3509509. agonzale@uninorte.edu.co; mbacca@uninorte.edu.co

Recibido: 29/09/2010 • Aceptado: 08/05/2011

*Ergonomic design model for work stations in smes.
Case study: Barranquilla (Colombia)*

ABSTRACT

• This article is framed into a macro project of collaboration between the Universidad del Norte and the private sector. The project looked for the modernization of an export oriented SME related with the industry of processing glass, steel and aluminum products to be used in architecture (e.g.: doors and windows), automotive industry (e.g.: tempered glass) and other industries (e.g.: cool logistics). The purpose of this article is to feature the activities and results achieved by the identification, definition and characterization of the micro system Person - Machine (P-M) of Small and Medium Enterprises (SMES) of the processing glass industry in Barranquilla-Colombia. The case study was the development of methods to establish a work dynamic to ensure optimum labor conditions in an ergonomic framework at the company Tempro S.A.

The diagnosis was done from the ergonomic global valuation of 21 workplaces applying the LEST method, which allowed determining the factors of risk of workers. Besides, the RULA method was used for the detection of the critical workplaces that need more detailed valuations on postures and efforts. This study was based on previous information about the loads of work, requirements, responsibilities, efforts and conditions of work and risk, in a general form.

As a result, the diagnosis allowed the identification of 11 critical postures. A single description of the microenvironment was performed for every posture under ideal conditions, redefining his characteristics and looking for requirements of use, function, structure, production, information and formals. A virtual computed simulation was designed to perform the ergonomic testing to analyze the critical tasks according to the diagnosis of valuation of postures and efforts.

• **Keywords:** ergonomic design, productivity, toughened glass, human factors, activity.

RESUMEN

Este artículo se enmarca dentro de un proyecto macro Universidad-Empresa, realizado por la Universidad del Norte de Barranquilla y cofinanciado por Colciencias, que buscaba modernizar una PYME tradicional, orientada a exportar productos resultantes de la transformación del vidrio y productos complementarios de acero y aluminio, destinados a la arquitectura (puertas y ventanas), vidrio templado para vehículos y vidrio para soluciones industriales.

En particular, el artículo tiene como finalidad la presentación de actividades y resultados logrados en la identificación, definición y caracterización del microsistema Persona-Máquina (P-M) de las pequeñas y medianas empresas (PYMES) transformadoras del vidrio templado en Barranquilla Colombia. El caso de estudio es la empresa Tempro S.A., para la que se desarrollaron métodos encaminados a establecer una dinámica de trabajo que asegure condiciones laborales óptimas desde un enfoque ergonómico.

La primera etapa consistió en el diagnóstico ergonómico global de 21 puestos de trabajo aplicando el método LEST, que permitió determinar los factores de riesgo a los que se encuentran mayormente expuestos los operarios. Previo a este estudio, se desarrolló un análisis ocupacional donde se contempló las cargas de trabajo, requerimientos, responsabilidades esfuerzos y condiciones de trabajo y riesgo, en forma general.

El diagnóstico permitió identificar 11 puestos considerados críticos, para los que se empleó el método RULA en la valoración de posturas y esfuerzos. Para

cada puesto de trabajo se realizó la descripción del microentorno requerido para el desarrollo de la actividad en óptimas condiciones, replanteando sus características y contemplando requerimientos de uso, función, estructurales, productivos, información y formales.

Para la comprobación ergonómica se diseñó y puso en práctica una técnica de simulación virtual computarizada, analizando las tareas consideradas críticas según el diagnóstico de valoración de posturas y esfuerzos.

Palabras clave: diseño ergonómico, productividad, vidrio templado, factores humanos, actividad.

1. INTRODUCCIÓN

Se trata de una empresa colombiana especializada en la transformación de vidrio templado que ha crecido significativamente, obteniendo mayor visibilidad en el mercado y, por consiguiente, un creciente volumen de proyectos. Para responder a los nuevos desafíos, la empresa requería con urgencia reestructurarse a nivel administrativo y operativo y en este sentido, la optimización ergonómica y definición de las funciones para los puestos de trabajo en planta, eran aspectos fundamentales en el mejoramiento del clima laboral e incremento de la productividad en la organización.

Rodríguez (2007) define al puesto de trabajo como un sistema que “está constituido por el ser humano y los medios de trabajo [máquinas], actuando en conjunto en el proceso de trabajo, en el espacio de trabajo y en el entorno de trabajo, según las condiciones de ejecución de la tarea que se va a realizar”¹.

Según Mondelo, et al. (2001), en el diseño ergonómico de puestos de trabajo es primordial priorizar al usuario sobre los demás actores. Por lo anterior, se establecen diferentes tipos de relaciones en la interfaz usuario – máquina y las interacciones entre ellos determinan las características que debería tener el puesto. En el desarrollo del proyecto de investigación se hizo énfasis en los siguientes tipos de relaciones:

- Relaciones dimensionales: buscan la compatibilidad entre las medidas antropométricas de los usuarios y las características formales de los componentes del puesto.
- Relaciones informativas: buscan la coherencia entre la actividad realizada y la percepción y transmisión de información necesaria para el desarrollo de las diferentes tareas.
- Relaciones de control: buscan la coherencia entre la máquina y la regulación de su funcionamiento empleando los mandos apropiados.

- Relaciones ambientales: buscan la compatibilidad de los usuarios con los componentes del microentorno ambiental (ruido, iluminación, microclima).
- Relaciones de manejo de cargas: buscan la disminución del esfuerzo requerido por el operario en el transporte y manipulación de objetos.

El objetivo principal de este estudio, en el contexto de la PYME transformadora de vidrio templado, consiste en diseñar y validar puestos de trabajo, a partir de la caracterización de su microentorno e interfaz usuario – máquina, optimizando las relaciones de tipo dimensional, informativo, control, ambiental y manejo de cargas. Para el estudio, siguiendo a Cruz y Garnica (2006, p.162), el microentorno es la zona volumétrica donde un operario o usuario desarrolla la tarea del manejo de la máquina o artefacto, supeditada a la distancia de manipulación y el espacio vital. En la Fig. 1 se puede apreciar uno de los conceptos fundamentales tenidos en cuenta en la investigación como es la relación existente entre el usuario-máquina y su microentorno.



Fig. 1: Interrelación Usuario-Máquina. Adaptado de Cruz et al. (2006, p.19). Fuente: Elaboración propia.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. DIMENSIONAMIENTO DE LA MUESTRA

La población objeto de estudio está constituida por las empresas dedicadas a la producción de vidrio templado, estructuras en acero y aluminio en Barranquilla, Colombia. La muestra está conformada por los puestos de trabajo en planta en las líneas de producción vidrio, acero y aluminio.

2.2. MÉTODOS

Para el diseño ergonómico de los puestos de trabajo se siguió un proceso que abarcó tres grandes etapas: identificación de oportunidades de mejora, caracterización de los puestos de trabajo y desarrollo de propuestas de diseño.

2.2.1. Identificación de Oportunidades de Mejora

Diagnóstico y Valoración Global

Se evaluaron 21 puestos de trabajo en planta categorizados según la línea de producción, ver Tabla 1.

¹ Rodríguez M. *Ergonomía básica*. 1ª edición. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, 2007. p.21. ISBN: 978-847-978-131-6

ACERO Y ALUMINIO	VIDRIO	OTROS
Almacén de Perfiles en Acero y Aluminio	Almacén de Vidrio Automotriz	Almacén de Suministros
Corte de Acero	Auxiliar de Horno	Cargue y Desgargue
Corte de Acero Mecanizado	Carpintería	
Fresado – Taladrado	Corte de Vidrio	
Marquetería de Aluminio	Diamantado	
Marquetería de Aluminio Mecanizada	Instalación de Vidrio Automotriz	
Pulido de Acero	Horno	
Soldado	Sandblasting	
Torno	Serigrafía	
	Taladro de Vidrio	

Tabla 1: Puestos de trabajo en planta empresa Tempro S.A.

Fuente: Elaboración propia basada en trabajo de campo.

De cada puesto se recolectaron datos mediante observación directa, registro en video y entrevistas a los operarios, lo cual permitió la identificación de las diferentes tareas de la actividad y su correspondiente flujo de trabajo. Para el análisis y diagnóstico se aplicó el método LEST (Laboratoire d'Economie et Sociologie du Travail), desarrollado por F. Guélaud, M.N. Beauchesne, J. Gautrat y G. Roustang en 1978. El método contempla 16 variables agrupadas en cinco dimensiones: ambiente físico, carga física, carga mental, aspectos psicosociales y tiempo de trabajo, como se observa en la Tabla 2.

ENTORNO FÍSICO	CARGA FÍSICA	CARGA MENTAL	ASPECTOS PSICOSOCIALES	TIEMPOS DE TRABAJO
Ambiente térmico	Carga estática	Apremio de tiempo	Iniciativa	Tiempo de trabajo
Ruido	Carga dinámica	Complejidad	Estatus social	
Iluminación		Atención	Comunicaciones	
Vibraciones		Minuciosidad	Relación con el mando	
			Identificación con el producto	

Tabla 2: Variables por cada dimensión según el método LEST.

Fuente: Diego-Más et al. (2006).

Cada dimensión es valorada por medio de las puntuaciones que presenta el método LEST. La evaluación global del puesto de trabajo oscila entre 0 y 10, indicando la situación de la actividad, ver Tabla 3.

Teniendo en cuenta que para el registro y procesamiento de los datos se utilizó como instrumento la aplicación en línea ergonautas.com, desarrollada por la Universidad

PUNTAJE	ACTUACIÓN
0, 1, 2	Situación satisfactoria
3, 4, 5	Débiles molestias. Algunas mejoras podrían aportar más comodidad al trabajador
6, 7	Molestias medias. Existe riesgo de fatiga
8, 9	Molestias fuertes. Fatiga
10	Nocividad

Tabla 3: Sistema de puntuación método LEST.

Fuente: Diego-Más et al. (2006).

Politécnica de Valencia (licencia tipo registro de usuario profesional, adquirida por la Universidad del Norte para esta investigación) y que ésta es una versión simplificada, se analizaron 14 de las 16 variables que contempla el método.

Los investigadores decidieron concentrar el análisis en las dimensiones entorno físico y carga física, dado que son éstas las directamente vinculadas con la descripción del microentorno e interfaz usuario – máquina.

Para estos cargos se hizo la valoración global ergonómica, con base a la tabla de puntuación, lo que permitió la identificación de 11 puestos de trabajo que presentaron desde molestias medias hasta nocividad (8 a 10 puntos) para las dimensiones ambiente físico y carga física, éstas últimas fueron priorizadas con base al alcance del proyecto, que buscaba intervenir los puestos en su redimensionamiento y caracterización de microentorno según las tareas de la actividad que implicaban un mayor esfuerzo físico. Ver Tabla 4.

Valoración de Posturas y Esfuerzos

Para el análisis de las tareas críticas en los puestos seleccionados se aplicó el método RULA (Rapid Upper Limb Assessment), desarrollado por los doctores McAtamney y Corlett de la Universidad de Nottingham en 1993 para evaluar la exposición de los trabajadores a factores de riesgo que pueden ocasionar trastornos en los miembros superiores del cuerpo: posturas, repetitividad de movimientos, fuerzas aplicadas, actividad estática del sistema músculo-esquelético.

El método RULA facilita el análisis de las relaciones angulares que las diferentes partes del cuerpo adoptan para determinada postura. En este sentido, la herramienta empleada fue el registro fotográfico de vistas paralelas a los planos corporales sagital y frontal, para posteriormente realizar las mediciones de los ángulos sobre las imágenes utilizando la aplicación ErgoMaster (licencia adquirida por la universidad para este proyecto de investigación)², siguiendo el procedimiento descrito por Chiner, et al. (2004) para la evaluación de riesgos posturales.

El método divide el cuerpo en dos grupos de segmentos: el grupo A (brazo, antebrazo, muñeca y giro de muñeca)

² Software versión 4.00.0029.

	PUESTO ANALIZADO	ENTORNO FÍSICO	CARGA FÍSICA
1	Almacén de Perfiles en Acero y Aluminio	10	10
2	Corte de Acero	10	10
3	Almacén de Vidrio Automotriz	10	10
4	Carpintería	10	10
5	Cargue y Descargue	10	10
6	Corte de Vidrio	9	10
7	Diamantado	9	10
8	Serigrafía	9	10
9	Almacén de Suministros	9	10
10	Sandblasting	8	9
11	Corte de Acero Mecanizado	8	10
12	Fresado - Taladrado	7	10
13	Pulidor de Acero	6,5	10
14	Taladro de Vidrio	5	10
15	Marquetería de Aluminio Mecanizada	5	10
16	Soldado	5	10
17	Torno	5	10
18	Auxiliar de Horno	5	10
19	Horno	5	10
20	Marquetería de Aluminio	5	3
21	Instalación de Vidrio Automotriz	3	3

Tabla 4: Selección de cargos a través de las dimensiones establecidas.
 Fuente: Elaboración propia con basada en trabajo de campo.

y el grupo B (cuello, tronco y piernas). La puntuación final de la postura para cada uno de los grupos corporales se obtiene a partir de la puntuación adjudicada a cada zona corporal, según tablas que suministra el método RULA. Las mediciones realizadas son principalmente angulares, contemplando además la actividad muscular realizada y la fuerza aplicada durante la realización de la tarea.

Para ilustrar el método, se presenta a manera de ejemplo la valoración para los brazos como parte del los miembros del grupo A. La puntuación del brazo es el resultado de las mediciones angulares de este miembro con respecto al eje del tronco como se visualiza en la Fig. 2.

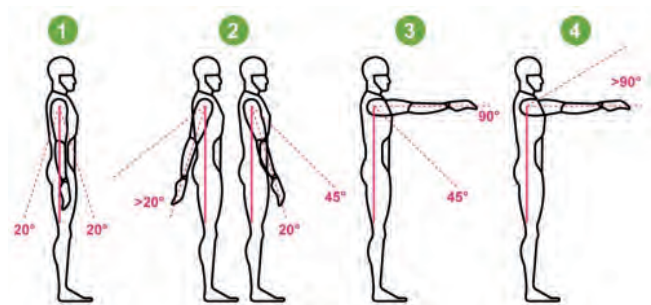


Fig. 2: Posiciones angulares brazo.
 Fuente: Elaboración propia basada en las instrucciones del método RULA.

La puntuación para las posiciones angulares se asigna según los valores suministrados por las tablas del método RULA. Ver Tabla 5.

PUNTOS	POSICIÓN
1	Desde 20° de extensión a 20° de flexión
2	Extensión >20° o flexión entre 20° y 45°
3	Flexión entre 45° y 90°
4	Flexión >90°

Tabla 5: Valores según las posiciones angulares brazo.
 Fuente: Diego-Más et al. (2006).

Después de analizar ambas categorías (A y B), se asignan puntajes globales para cada una y se determina el puntaje final con las indicaciones sobre la actuación para cada tarea, según Tabla 6.

NIVEL	ACTUACIÓN
1	Cuando la puntuación final es 1 ó 2 la postura es aceptable.
2	Cuando la puntuación final es 3 ó 4 pueden requerirse cambios en la tarea: es conveniente profundizar en el estudio
3	La puntuación final es 5 ó 6. Se requiere el rediseño de la tarea; es necesario realizar actividades de investigación.
4	La puntuación final es 7. Se requieren cambios urgentes en el puesto o tarea.

Tabla 6: Sistema de puntuación método RULA.
 Fuente: Diego-Más et al. (2006).

El procedimiento de aplicación de este método consiste principalmente en lo siguiente:

- Identificar los ciclos de trabajo y seleccionar las posturas que se evaluarán.
- Identificar, para cada postura, el lado del cuerpo (izquierdo o derecho) que se debe evaluar.
- Determinar las puntuaciones para cada parte del cuerpo
- Obtener la puntuación final del método y el nivel de actuación para determinar la existencia de riesgos.
- Revisar las puntuaciones de las diferentes partes del cuerpo para determinar dónde es necesario aplicar correcciones en el diseño del puesto.

2.2.2. Caracterización propuesta para los puestos de trabajo

Después de varios análisis, los investigadores decidieron tomar como referencia los parámetros antropométricos de la población laboral colombiana ACOPLA 95, estudio realizado por Estrada et al. (1995) para el Instituto de Seguros Sociales, dado que contempla las medidas antropométricas de las diferentes regiones del país, lo que permitió tomarlos como base para el desarrollo del proyecto.

CAT.	SUBCAT.	REQUERIMIENTOS ESPECÍFICOS	PARÁMETRO ACTIVADO	FACTOR INFLUENCIADO	PERCENTILES	DIMENSIONES cm
Función	Mecanismo	Debe facilitar la labor de rociar la arena en función de la presión y la dirección requerida	Altura radial (codo) de pie	Mecanismos de trabajo	N/A	N/A
	Confiabilidad	Debe aplicar la arena en las condiciones que requiere la actividad	N/A	Mecanismos de trabajo	N/A	N/A
	Factores Humanos	Debe evitar la adopción de posturas incorrectas	Rotación Tronco Altura radial (codo) de pie	Alcances Alturas	Rot. Tronco: Todos Altura radial (codo) de pie: rango 5 y 95	Rot. Tronco: 35° Altura radial (codo) de pie: entre 98.7 y 114.3 cm
		Debe permitir la adopción de posturas de descanso por tiempos de ejecución de tareas	Altura ingle Altura radial (codo) de pie	Alcances Alturas Mecanismos de trabajo	Altura ingle: rango P5 y 95 Altura radial (codo) de pie: rango 5 y 95	Altura ingle: 78.2 y 91.9cm Altura radial (codo) de pie: entre 98.7 y 114.3 cm
		Debe minimizar el esfuerzo a realizar	Brazo – Antebrazo Zona dorsal	Alcances Ubicación de componentes	N/A	N/A
	Resistencia	Debe ser resistente a rayaduras y precisión	N/A	Materiales	N/A	N/A

Tabla 7: Ejemplo especificación de requerimientos ergonómicos. Modificado de Mondelo et al. (2001 p.59).

Fuente: Elaboración propia.

Caracterización puesto de trabajo

Los investigadores realizaron la descripción de cada puesto de trabajo a partir del diagnóstico y los resultados de la valoración de posturas y esfuerzos. De este modo, según el trabajo realizado en cada tarea (liviano, moderado, pesado), se definieron características básicas de la interfaz usuario – máquina, tales como: la postura del operario (erguido o sentado), planos o superficies de trabajo (superior, medio o bajo), relaciones de movimiento, y dimensiones antropométricas para los percentiles 5 y 95, abarcando así al 90% de la población; de igual forma, se tomó como base a la población masculina entre 20 y 59 años.

Para dimensionar los puestos de trabajo, los valores del percentil 5 se emplearon como referente para los alcances de las extremidades que requieren la extensión del cuerpo o alcances máximos y los valores del percentil 95 permitieron asignar las medidas para componentes del puesto que respondían a holguras.

Siguiendo con lo anterior, se especificaron también los requerimientos ergonómicos, categorizados por uso, función, estructurales, productividad, identificación y formales. En la Tabla 7 se visualiza un ejemplo a partir del trabajo realizado por los investigadores acerca de las especificación de requerimientos ergonómicos, tomando como base la estructura planteada por Mondelo, et al. (2001) para la descripción de relaciones funcionales.

Caracterización del microentorno

Por otro lado, en esta etapa se especifican también las condiciones que debe cumplir el microentorno y los factores a priorizar en el diseño del puesto de trabajo: área total que ocupa, zonas de circulación, iluminación y ambiente térmico requeridos para el desarrollo de la actividad.

2.2.3. Desarrollo de propuestas de diseño

A partir de la caracterización de la interfaz usuario–máquina y la identificación de las tareas con mayor riesgo, se diseñaron las máquinas que hacen parte del puesto. Se establecieron el plano o superficie de trabajo, las zonas para el movimiento del operario y otros aspectos influenciados por los ángulos de barrido, visión, anchuras y alturas de acuerdo con las dimensiones antropométricas de la población laboral colombiana. Para cada diseño de máquina se hicieron modelos digitales computarizados utilizando el programa 3DStudio MAX (licencia propiedad de la Universidad del Norte).

Posteriormente se comprobó el mejoramiento de las condiciones del operario, por lo que se confrontaron los resultados obtenidos en la valoración de posturas y esfuerzos realizada en la etapa de identificación de oportunidades de mejora. Como la construcción de los modelos físicos de comprobación requería una mayor inversión por parte de la PYME, el empresario y los investigadores acordaron hacer una simulación virtual computarizada. Con base en

los valores antropométricos de los percentiles 5 y 95, se hicieron modelos digitales de dos usuarios ideales para cada grupo, siguiendo a Mondelo, et al. (2001) en su ejemplo de la familia Maximín.

Los modelos humanos se animaron para que adoptaran las posturas necesarias según la tarea y se capturaron imágenes para realizar comprobaciones de salida aplicando el método RULA. Como instrumento de modelado y animación se empleó la aplicación de software 3DStudio MAX.

3. PROCESO Y RESULTADOS

3.1. CASO DE ESTUDIO: PUESTO DE TRABAJO ALMACÉN DE PERFILES

A continuación se presenta como ejemplo el procedimiento para el puesto de trabajo Almacén de perfiles, siguiendo el método propuesto en el numeral 1.2. Antes de continuar con la sección, se debe anotar que el haber seleccionado el almacén de perfiles tuvo como razones ser uno de los puestos de trabajo con mayor puntaje en las dimensiones entorno físico y carga física, y además las sugerencias del dueño de la empresa de iniciar con este puesto por las continuas quejas de inconformidad y rotación que se presentaban en el mismo.

3.1.1. Identificación de Oportunidades de Mejora

Para el puesto de trabajo seleccionado, se intensificó la observación directa y el trabajo fotográfico, lo mismo que una entrevista de análisis ocupacional que permitió determinar las oportunidades de mejora relacionadas con: transporte de perfilería, almacenamiento de perfilería, alcances máximos y condiciones ambientales, como se muestra en la Figura 3.



Fig. 3: Condiciones de inicio almacén de perfiles.
 Fuente: Fotografía realizada por los investigadores al inicio del estudio.

Diagnóstico y Valoración Global

El puesto de trabajo almacén de perfiles es el área destinada al almacenamiento de bloques de perfiles, previo al ensamble de éstos con los vidrios. La actividad consiste en realizar el proceso de almacenaje de perfilería en aluminio y acero: recepción, clasificación, codificación, despacho e inventario. Por las dimensiones y pesos de los perfiles, se consideran críticas las posturas angulares y esfuerzos que adopta el operario al momento de izar cargas y clasificar los perfiles. En la siguiente figura se muestra el flujo de la actividad del puesto de trabajo.

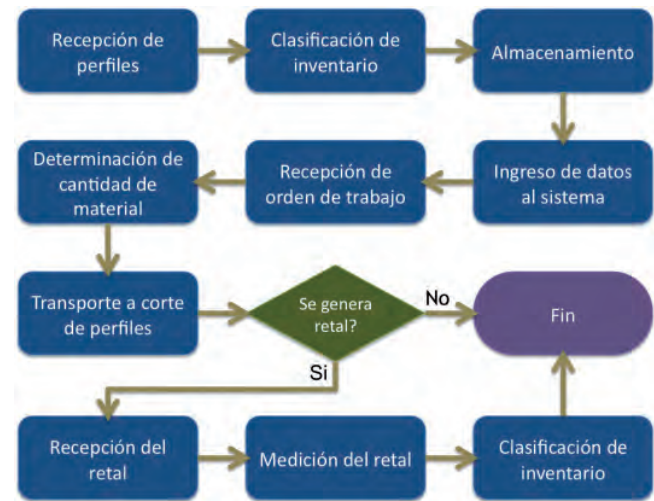


Fig. 4: Flujo de actividad almacén de perfiles.
 Fuente: Elaboración propia basado en trabajo de campo.

Se evaluaron 14 variables del método LEST, agrupadas en cinco dimensiones: carga física, entorno físico, carga mental, aspectos psico-sociales y tiempo de trabajo, en los que los resultados muestran cómo la carga física y el entorno físico son críticos, con puntuación de 10, como se observa en la figura siguiente.

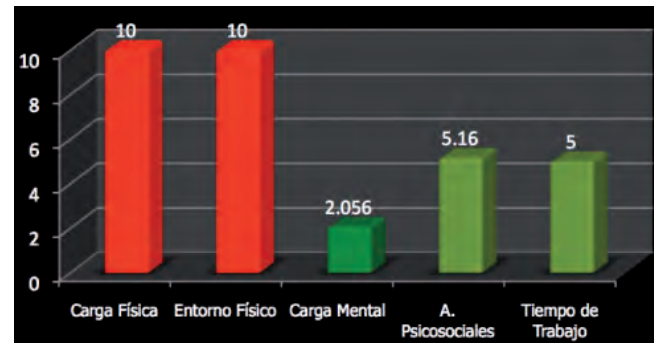


Fig. 5: Valoración global del puesto almacén de perfiles.
 Fuente: Elaboración propia basada los resultados del software ergonautas.com.

De acuerdo con los resultados por dimensiones, se presenta un ambiente nocivo para carga física (10 puntos) específicamente por problemas relacionados con la carga

dinámica; en algunos casos el operario debe transportar piezas con un peso superior a 20kg en distancias mayores a 3m; en promedio, las cargas se transportan entre 10 y 30 veces por hora.

Otra dimensión que presenta un ambiente nocivo es el entorno físico (10 puntos), afectado principalmente por la temperatura, pues oscila entre 28 y 34°C durante un período de tiempo de la jornada laboral. En la siguiente figura se detallan los puntajes obtenidos por variable en las diferentes dimensiones estudiadas.

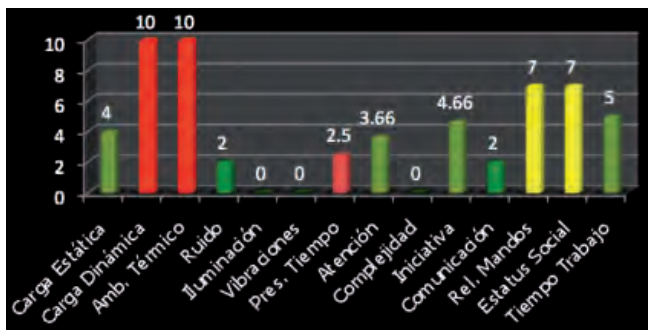


Fig. 6: Valoración por variables puesto almacén de perfiles.

Fuente: Elaboración propia basada los resultados del software ergonomautas.com.

Resultados Valoración de Posturas y Esfuerzos

Almacenamiento: cada perfil pesa aproximadamente 4Kg, almacenados por tipo de material y clasificados según las líneas de productos de la empresa. Los estantes para su ubicación están a una altura máxima de 1.8m desde el suelo, lo que ocasiona que el trabajador deba levantar los brazos para poder alcanzar los perfiles almacenados allí. La altura del operario también es un factor que influye en las distancias y los esfuerzos realizados en la actividad. Las posturas críticas ocurren al alcanzar los perfiles de los estantes que se encuentran a mayor y menor altura (30cm).



Fig. 7: Medición de ángulos diagnóstico almacenamiento – puesto almacén de perfiles.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 8 se muestran los resultados del análisis de la postura adoptada para alcanzar los perfiles en los estantes altos, tomando como base las mediciones angulares y los parámetros del método RULA.

RESULTADO RULA DIAGNÓSTICO	
Puntaje brazo	6
Puntaje antebrazo	1
Puntaje muñeca	3
Puntaje giro de muñeca	1
Puntaje postura muñeca/brazo	7
Puntaje actividad muscular muñeca/brazo	0
Puntaje esfuerzo/carga muñeca/brazo	1
Puntaje final muñeca/brazo	8
Puntaje cuello	2
Puntaje tronco	2
Puntaje piernas	1
Puntaje postura tronco	2
Puntaje actividad muscular tronco	0
Puntaje esfuerzo/carga tronco	1
Puntaje final cuello, tronco y piernas	3
PUNTAJE FINAL	6

Tabla 8: Puntuación diagnóstico tarea almacenamiento – puesto almacén de perfiles.

Fuente: Elaboración propia basada los resultados del software ErgoMaster.

La puntuación final del análisis fue de 6, lo que indica que es necesario el rediseño de la tarea como lo sugiere el método RULA.

3.1.2. Caracterización propuesta para el puesto de trabajo seleccionado

Según las características de las tareas realizadas en el puesto almacén de perfiles, los investigadores determinaron las siguientes dimensiones antropométricas, con los valores para los percentiles 5 y 95, ver Fig. 8.

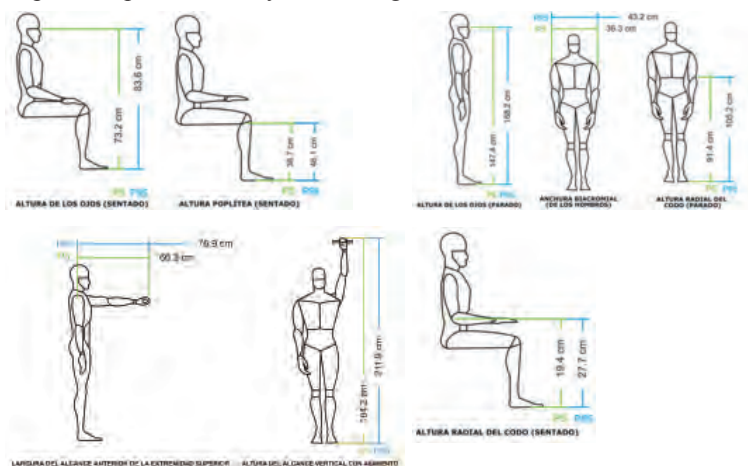


Fig. 8: Dimensiones antropométricas percentiles 5 y 95.

Fuente: Elaboración propia basado en las tablas antropométricas del estudio ACOPLA 95.

Los valores antropométricos se emplearon en la construcción de los modelos humanos para cada percentil, utilizando el software 3D Studio MAX, como se observa en las Fig. 9 y 10.



Fig. 9: Modelos humanos percentiles 5 y 95.
Fuente: Elaboración propia con el programa 3D Studio MAX.

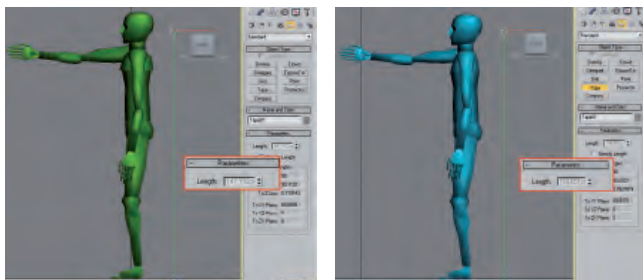


Fig. 10: Construcción de modelos humanos percentiles 5 y 95: asignación de medida altura de los ojos (parado).
Fuente: Elaboración propia con el programa 3D Studio MAX.

Caracterización puesto de trabajo

El puesto de trabajo almacén de perfiles está conformado por el área que se genera a partir de la interacción entre el usuario, la estantería para el almacenamiento de los perfiles y la plataforma rodante para el cargue y descargue de la materia prima.

Plano o Superficie de Trabajo: se determinó la utilización del plano anterior vertical del cuerpo a la altura del codo en posición de pie, con extensión horizontal para el almacenamiento de los perfiles no procesados. Se propone un área de 1.093m de alto x 5m de ancho para facilitar el almacenamiento de perfiles de 6m de longitud. El tipo de actividad desarrollada involucra trabajo pesado, razón por la que la altura superior de la superficie de trabajo (soporte de materia prima) debe ser menor a la altura de los codos del trabajador-usuario.

Movimiento: se delimitaron áreas necesarias para zonas de libre circulación para un operario con la herramienta de trabajo en uso (plataforma rodante para el cargue y descargue de la materia prima). En el mismo sentido, se planteó la posibilidad de graduación del plano superior de trabajo mediante un sistema de elevación de piñón-cremallera y facilitar el alcance máximo de las repisas de almacenamiento, disminuyendo el esfuerzo hecho por el operario.

Requerimientos ergonómicos: siguiendo la estructura planteada por Mondelo, et al (2001), se plantearon los requerimientos del puesto, categorizados por uso, función, estructura, productividad, identificación y forma. En la

Tabla 9 se presentan los requerimientos establecidos para la relación de uso.

Caracterización del microentorno

Desde el punto de vista del microentorno laboral, tiene un área total de 160.92 m², para el almacenamiento de perfiles angulares, tubos y listones de acero y aluminio. Se propuso destinar un área especial para agrupar los retales. Igualmente se delimitaron zonas para el tránsito de trabajadores-usuarios y de una plataforma rodante para el cargue y descargue de la materia prima.

Zona de Circulación: se propuso una distancia de 300cm entre cada uno de los sistemas para el almacenamiento de perfiles, teniendo en cuenta que según Panero y Zelnik (1991) la anchura mínima recomendada para pasillos de doble circulación es de 172.7 cm para dos cuerpos de percentil 95; los 127.3cm restantes corresponden al espacio para el traslado (holgado) de la plataforma rodante transportando materia prima e insumos, ver Fig. 11.

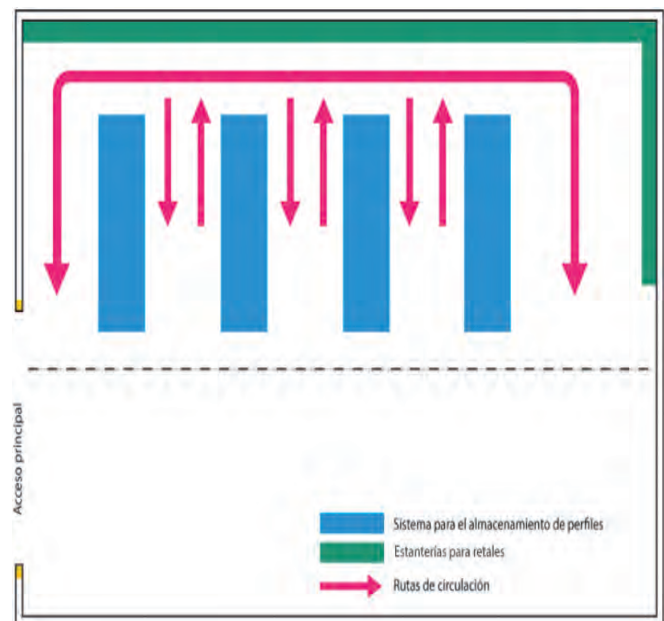


Fig. 11: Distribución área de trabajo almacén de perfiles.
Fuente: Elaboración propia basado en Panero y Zelnik (1991)

Iluminación: según la norma GTC-8 de ICONTEC (1994, p.21)³, para áreas generales en las construcciones de tipo almacenes-bodegas, se recomendó que el nivel de iluminancia del área de trabajo oscile entre 100 a 150 lx (intervalos inferiores de la misma). Para áreas de circulación, orientación simple y visitas cortas temporales en recintos interiores se recomendó que el nivel de iluminancia del área

³ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. *Electrotecnia. Principios de Ergonomía Visual. Iluminación para Ambientes de Trabajo en Espacios Cerrados. GTC 8. Bogotá: ICONTEC, 1994. p.21.*

REQUERIMIENTOS DE DISEÑO ALMACÉN DE PERFILES						
CAT.	SUBCAT.	REQUERIMIENTOS ESPECÍFICOS	PARÁMETRO ACTIVADO	FACTOR INFLUENCIADO	PERCENTILES	DIMENSIONES cm
	Seguridad	Debe facilitar la manipulación de perfiles en diferentes alturas	Altura vertical máxima Largura del Alcance Anterior de la Extremidad Superior Altura radial (codo) de pie	Mecanismos de trabajo	Alcance vertical máximo: P5 Largura de Alcance: P5 Altura radial (codo) de pie: rango P5 y 95	Alcance vertical máximo: 198.3 cm Largura de alcance: 66.3 cm Altura radial (codo) de pie: entre 98.7 y 114.3 cm
		Debe proteger el operario durante cargue /descargue de material	Brazo - Antebrazo Hombros Zona dorsal-lumbar	Mecanismos de trabajo Elementos de protección	N/A	N/A
		Debe proteger el material de deformaciones	N/A	Distribución de componentes Mecanismos de trabajo	N/A	N/A
	Mantenimiento	Debe facilitar la limpieza del área de almacenaje	N/A	Accesos Geometría	N/A	N/A
		Debe facilitar el proceso de mantenimiento	N/A	Accesos Geometría	N/A	N/A
	Reparación	Debe requerir menor cantidad de piezas y componentes	N/A	Componentes Estructura	N/A	N/A
		Debe tener disponibilidad de repuestos en el mercado	N/A	Piezas estándar	N/A	N/A
	Ergonomía	Debe facilitar la ubicación y clasificación de perfiles	Largura del Alcance Anterior de la Extremidad Superior Postura región dorsal lumbar Altura radial (codo) de pie	Distribución de componentes Mecanismos de trabajo	Largura de Alcance: 5 Altura radial (codo) de pie: rango 5 y 95	Largura de alcance: 66.3 cm Altura radial (codo) de pie: entre 98.7 y 114.3 cm
		Debe minimizar el tiempo y esfuerzo requerido para realizar la actividad mejorando las condiciones de trabajo.	Brazo - Antebrazo Zona dorsal-lumbar	Alcances Mecanismos de trabajo	N/A	N/A
		Debe especificar alcances/ alturas máximas y mínimas	Zona lumbar Zona dorsal Brazo-Antebrazo	Alcances Alturas	N/A	N/A
		Debe optimizar el proceso de ubicación, selección y traslado de material	Largura de Alcance Anterior de la Extremidad Superior Posturas región dorsal lumbar Altura radial (codo) de pie	Alcances Alturas	Largura de Alcance: 5 Altura radial (codo) de pie: rango 5 y 95 Angulaciones en columna	Largura del alcance: 66.3 cm Altura radial (codo) de pie: entre 98.7 y 114.3 cm Angulaciones en columna: Lumbar: 30 Dorsal: 33

Tabla 9: Requerimientos de uso – puesto almacén de perfiles.

de trabajo varíe de 50 a 100 lx (intervalos inferiores de la misma).

Ambiente Térmico: se sugirió que el ambiente térmico del entorno no alcance niveles superiores a los 25°C de temperatura. Para épocas en las que este nivel tiende a aumentar, se recomendó la instalación de reguladores de temperatura (ventiladores) que propicien condiciones de confort para la protección del trabajador-usuario de un ambiente de trabajo caluroso y crítico que derive en la adquisición de enfermedades.

3.1.3. Propuesta de diseño ergonómico

La propuesta de diseño ergonómico del puesto de trabajo consiste en una estructura rígida constituida por un eje central al cual se anclan seis bandejas sobre las cuales se ubican los bloques de perfiles. Las bandejas se desplazan a través del eje de forma perpendicular por medio de un sistema de elevación formado por ocho piñones cremallera accionados mediante dos manivelas ubicadas en los laterales del estante de almacenaje. Para el desarrollo de la alternativa se tuvieron

en cuenta aspectos ergonómicos como alcances máximos, largura de la extremidad superior y alturas, minimizando así los índices de esfuerzo físico y posturas angulares requeridas para el desarrollo de la labor, ver Fig. (s). 12, 13,14 y 15.

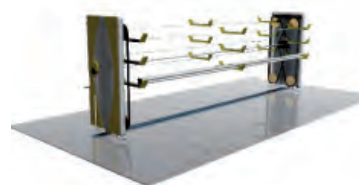


Fig. 12: Propuesta ergonómica puesto de trabajo almacén de perfiles, tarea almacenamiento. Fuente: Elaboración propia utilizando el software 3DStudio MAX.

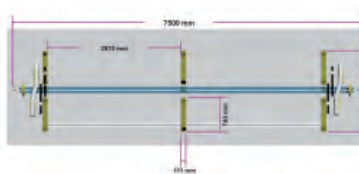


Fig. 13: Vista superior puesto de trabajo almacén de perfiles, tarea almacenamiento. Fuente: Elaboración propia utilizando el software 3DStudio MAX.

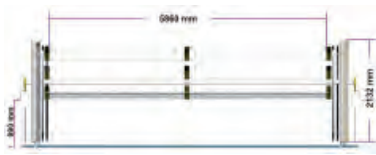


Fig. 14: Vista frontal puesto de trabajo almacén de perfiles, tarea almacenamiento.
 Fuente: Elaboración propia utilizando el software 3DStudio MAX.

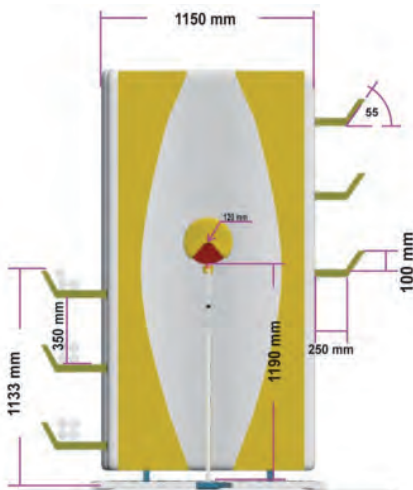


Fig. 15: Vista lateral puesto de trabajo almacén de perfiles, tarea almacenamiento.
 Fuente: Elaboración propia utilizando el software 3DStudio MAX.

Comprobación Virtual Computarizada

En la siguiente figura se presenta la simulación con el usuario percentil 5, realizando la tarea de ubicación de perfiles en el puesto de trabajo. Sobre el modelo humano se simularon las posiciones angulares para el desarrollo de la tarea haciendo uso del Software 3DStudio MAX.

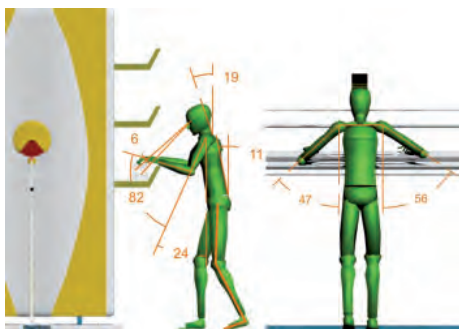


Fig. 16: Medición de ángulos percentil 5, propuesta ergonómica puesto de trabajo almacén de perfiles, tarea almacenamiento.
 Fuente: Elaboración propia utilizando el software 3DStudio MAX.

Los resultados de la comprobación virtual aplicando el método RULA se presentan en la Tabla 10.

Como se puede apreciar en la tabla anterior, el puntaje final fue de 3, lo cual quiere decir que es conveniente profundizar en el estudio del puesto cuando se realice con modelos de comprobación reales.

En la Fig. 17 se presentan la simulación con el usuario percentil 95 realizando la misma tarea de ubicación de perfiles en el puesto de trabajo. Sobre el modelo humano se simularon las posiciones angulares para el desarrollo de la tarea haciendo uso del Software 3DStudio MAX, ver Figuras 16 y 17.

RESULTADO RULA COMPROBACIÓN	
Puntaje brazo	3
Puntaje antebrazo	1
Puntaje muñeca	1
Puntaje giro de muñeca	1
Puntaje postura muñeca/brazo	2
Puntaje actividad muscular muñeca/brazo	0
Puntaje esfuerzo/carga muñeca/brazo	1
Puntaje final muñeca/brazo	3
Puntaje cuello	2
Puntaje tronco	2
Puntaje piernas	1
Puntaje postura tronco	2
Puntaje actividad muscular tronco	0
Puntaje esfuerzo/carga tronco	1
Puntaje final cuello, tronco y piernas	3
PUNTAJE FINAL	3

Tabla 10: Puntuación percentil 5, propuesta ergonómica puesto de trabajo almacén de perfiles, tarea almacenamiento.

Fuente: Elaboración propia basada los resultados del software ErgoMaster.

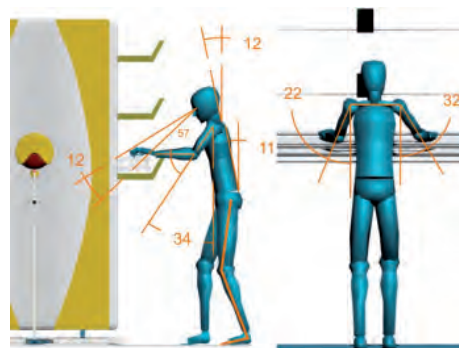


Fig. 17: Medición de ángulos percentil 95, propuesta ergonómica puesto de trabajo almacén de perfiles, tarea almacenamiento.
 Fuente: Elaboración propia utilizando el software 3DStudio MAX.

Los puntajes del estudio anterior se dan en la Tabla 11.

RESULTADO RULA DIAGNÓSTICO	
Puntaje brazo	3
Puntaje antebrazo	1
Puntaje muñeca	1
Puntaje giro de muñeca	1
Puntaje postura muñeca/brazo	2
Puntaje actividad muscular muñeca/brazo	0
Puntaje esfuerzo/carga muñeca/brazo	1
Puntaje final muñeca/brazo	3
Puntaje cuello	2
Puntaje tronco	2
Puntaje piernas	1
Puntaje postura tronco	2
Puntaje actividad muscular tronco	0
Puntaje esfuerzo/carga tronco	1
Puntaje final cuello, tronco y piernas	3
PUNTAJE FINAL	3

Tabla 11: Puntuación percentil 95, propuesta ergonómica puesto de trabajo almacén de perfiles, tarea almacenamiento.

Fuente: Elaboración propia basada los resultados del software ErgoMaster.

Como se puede apreciar en la tabla anterior, el puntaje final también es de 3, lo cual quiere decir que es conveniente profundizar en el estudio del puesto cuando se realice con modelos de comprobación reales.

4. CONCLUSIONES

Del diseño ergonómico de puestos de trabajo realizado en este estudio se concluye lo siguiente:

La caracterización de las condiciones del puesto de trabajo, así como la comprobación virtual computarizada realizada con los modelos humanos constituyen una alternativa válida y rentable que brinda a las PYMES un punto de partida para la toma de decisiones. No obstante, el uso de esta técnica no excluye la realización de un plan de comprobaciones reales con modelos físicos que permitan una retroalimentación con mayor exactitud.

Si bien se tomó la decisión de utilizar los métodos LEST y RULA para hacer la valoración global ergonómica, así como de las posturas y esfuerzos, es importante aclarar las limitantes de cada uno. En el caso del método LEST sólo debe utilizarse para puestos de trabajo en los cuales las condiciones ambientales y el lugar de trabajo no sean variables, y de igual manera, el método RULA es válido para el análisis de actividades que impliquen en mayor medida el uso de las extremidades superiores sobre las extremidades inferiores.

Mediante la realización de modificaciones dimensionales y adecuaciones tecnológicas propuestas para cada actividad, la comprobación virtual computarizada presentó resultados satisfactorios para los usuarios que corresponderían a los percentiles 5 y 95. El 80% de los puestos pasó de presentar altas puntuaciones (5 a 7) a puntuaciones admisibles que constituyen condiciones convenientes para el bienestar del usuario (1 y 2).

Pese a la notable mejoría lograda en los diferentes puestos de trabajo a nivel de posturas y esfuerzos según la comprobación realizada con el método RULA, el 16% aún maneja puntuaciones que revelan la necesidad de realizar cambios (3 y 4) que se sugiere, deben ir ligados a la incorporación procesos mecánicos y/o automatizados; es el caso de los puestos almacén de perfiles, pulido de acero, y cargue y descargue de suministros.

La intervención ergonómica de cada puesto de trabajo estuvo enfocada en cambios dimensionales teniendo en cuenta aspectos antropométricos buscando el mayor grado de confort para que el usuario desarrolle la actividad, disminuyendo el tiempo empleado durante su ejecución, y procurando un mayor nivel de productividad.

La investigación tuvo el acompañamiento de los directivos de la empresa y fue recibido a satisfacción dado el interés de ponerlo en práctica en una siguiente etapa de desarrollo.

5. AGRADECIMIENTOS

Este artículo es parte del proyecto titulado “Modelación de plantas y desarrollo de un sistema de soporte para la programación de operaciones industriales de producción integrado con la logística y transporte del vidrio templado de Tempro s.a.” GRANTS: Cod. 1215-403-20119. CT. 469-2007 Cofinanciado por Colciencias.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Chiner M, Diego A, Alcaide J. Laboratorio de Ergonomía. 1ª edición. México: Alfaomega, 2004. 213p. ISBN: 970-15-0887-4
- Cruz A, Garnica A. Principios de Ergonomía. 3ª edición. Bogotá: Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 2004. 230p. ISBN: 958-648-454-8
- Estrada J, Restrepo M, Parra M, et al. Parametros antropométricos de la población laboral colombiana. Estudio ACOPLA95. Medellín: Universidad de Antioquia, 1995. 232 p.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Electrotecnia. Principios de Ergonomía Visual. Iluminación para Ambientes de Trabajo en Espacios Cerrados. GTC 8. Bogotá: ICONTEC, 1994.
- Mondelo P, Gregory E, Blasco J, et al. Ergonomía 3: Diseño de puestos de trabajo. 2ª edición. Barcelona: Alfaomega, 2001. 270p. ISBN: 970-15-0298-1
- Panero J, Zelnik M. Las dimensiones humanas en los espacios interiores: Estándares antropométricos. Castán Santiago (trad.). México: Gustavo Gili, 1991. 306 p. ISBN: 968-6085-97-1
- Rodríguez M. Ergonomía básica. 1ª edición. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, 2007. 278 p. ISBN: 978-847-978-131-6
- Diego-Más José, Asencio Sabina. Método LEST - Evaluación global del puesto de trabajo - ergonomía y prevención de riesgos laborales [en línea]. Universidad Politécnica de Valencia, 2006 [ref. de septiembre 2009]. Capítulo I. Fundamentos del método. Disponible en World Wide Web:
- <http://www.ergonautas.upv.es/metodos/lest/lest-ayuda.php>
- Diego-Más José, Asencio Sabina. Método RULA - Rapid Upper Limb Assessment - ergonomía y prevención de riesgos laborales [en línea]. Universidad Politécnica de Valencia, 2006 [ref. de septiembre 2009]. Capítulo I. Fundamentos del método. Disponible en World Wide Web: <<http://www.ergonautas.upv.es/metodos/rula/rula-ayuda.php>

Predicción de la temperatura de la contención primaria de una central nuclear mediante redes neuronales



Antonio Álvarez-Huerta*
Rodrigo González-Miguel*
David García-Metola**
Álvaro Noriega-González***

Ingeniero Industrial
Ingeniero Industrial
Licenciado en Física
Dr. Ingeniero Industrial

* NUCLENOR. Sección Operación y ** Ingeniería de Planta. Central Nuclear Sta. M^a de Garoña – 09212 Burgos. Tfno: +34 947 349400. antonio.alvarez@nuclenor.es; rodrigo.gonzalez@nuclenor.es; david.garcia@nuclenor.es

*** UNIVERSIDAD DE OVIEDO. Área de Ingeniería Mecánica. Edificio Departamental Oeste. Módulo 5. Campus de Viesques, s/n - 33203 Gijón. Tfno: +34 985 182469. noriegaalvaro@uniovi.es

Recibido: 09/12/2010 • Aceptado: 21/03/2011

Drywell temperature prediction of a nuclear power plant by means of artificial neural networks

ABSTRACT

- In a nuclear power plant, Drywell atmosphere temperature is an important operating parameter, for which technical specifications in each power plant set a limit in normal operation. This limit is an initial condition in the analysis of safety requirements. Specifically, in Santa María de Garoña's power plant, this temperature has an upper limit in normal operation of 58 °C. The cooling system installed to remove the heat produced inside the Drywell consists mainly of refrigeration units (3), pumps (2), and heat exchangers or HVH equipments (5). The pump in service drives the coolant (demineralized water) previously cooled by refrigeration units in service (2), which flow through the battery of the 5 heat exchangers, cooling Drywell atmosphere, which is inerted with nitrogen. Thus, the heated coolant returns to the refrigeration units completing the circuit. In case of unavailability of any HVH in service, it would occur a slight increase in average Drywell temperature. This article shows the use of neural networks to predict the evolution of Drywell atmosphere temperature against the variation of different variables that influence it, such as service water temperature (cold sink of the system), the setting of the compressors of the refrigeration units, the core flow and the number of HVH working. Neural networks used in this article incorporate all historical knowledge stored about the different ways of cooling system operation for the Drywell atmosphere temperature, and they show high accuracy in predicting that temperature. Thereby, they are a useful tool for taking decisions over the operating point of the system.
- **Keywords:** nuclear power plant, cooling system, Drywell temperature, artificial neural network.

RESUMEN

En las centrales nucleares, la temperatura de la atmósfera de Contención Primaria es un parámetro operativo relevante, para el cual las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento de cada instalación fijan un valor límite en operación normal. Dicho límite es una condición inicial en los análisis de seguridad aplicables. En el caso de la *Central Nuclear de Santa María de Garoña* el límite para la temperatura media de la atmósfera de Contención Primaria en operación normal es de 58 °C. El sistema de refrigeración instalado para extraer el calor que se produce en el interior de la Contención consta principalmente de grupos frigoríficos (3), bombas (2), y climatizadores o equipos HVH (5). La bomba en servicio impulsa el fluido refrigerante (agua desmineralizada) previamente refrigerado por los grupos frigoríficos en servicio (2), que circula por las baterías de los 5 climatizadores refrigerando la atmósfera de la Contención, la cual está inertizada con nitrógeno. De esta manera, el fluido refrigerante calentado retorna a los grupos frigoríficos completando así el circuito. En caso de indisponibilidad de los climatizadores en servicio, se produciría un ligero aumento en la temperatura media de la Contención.

En este artículo se muestra el uso de redes neuronales para predecir la evolución de la temperatura de la atmósfera de Contención ante la variación de las distintas variables que influyen en la misma, como son la temperatura del agua de servicios (foco frío de los grupos frigoríficos), los tarados de temperatura de los compresores de los grupos frigoríficos, el caudal del núcleo y el número de climatizadores en servicio.

Las redes neuronales utilizadas incorporan todo el conocimiento histórico almacenado de los distintos modos de

funcionamiento del sistema de refrigeración de la atmósfera de la Contención y muestran una elevada exactitud en la predicción de la temperatura de la Contención Primaria, configurándose así como una herramienta operativa muy útil para la toma de decisiones sobre el punto de funcionamiento del sistema.

Palabras clave: central nuclear, sistema de refrigeración, temperatura de contención primaria, red neuronal artificial.

1. INTRODUCCIÓN

La Contención Primaria conocida también como *Drywell*, es la estructura de contención en torno al reactor y a su sistema de recirculación en reactores de agua en ebullición. Normalmente es una estructura cilíndrica de hormigón armado con una tapa extraíble de acero para poder acceder a la vasija del reactor en situación de recarga (Figura 1). Proporciona un sistema de reducción de la presión en caso de accidente con pérdida de refrigerante (LOCA), dirigiendo el vapor liberado hacia la piscina de supresión donde se produciría la condensación del vapor, además de ser una barrera para los productos de fisión [1], con lo cual, supone, además, una barrera efectiva para la seguridad nuclear, del público en general y del medioambiente.

La temperatura de la Contención Primaria debe mantenerse en operación normal por debajo de 58 °C por Especificaciones Técnicas de Funcionamiento [2], ya que se trata de una de las hipótesis de partida para que en el caso

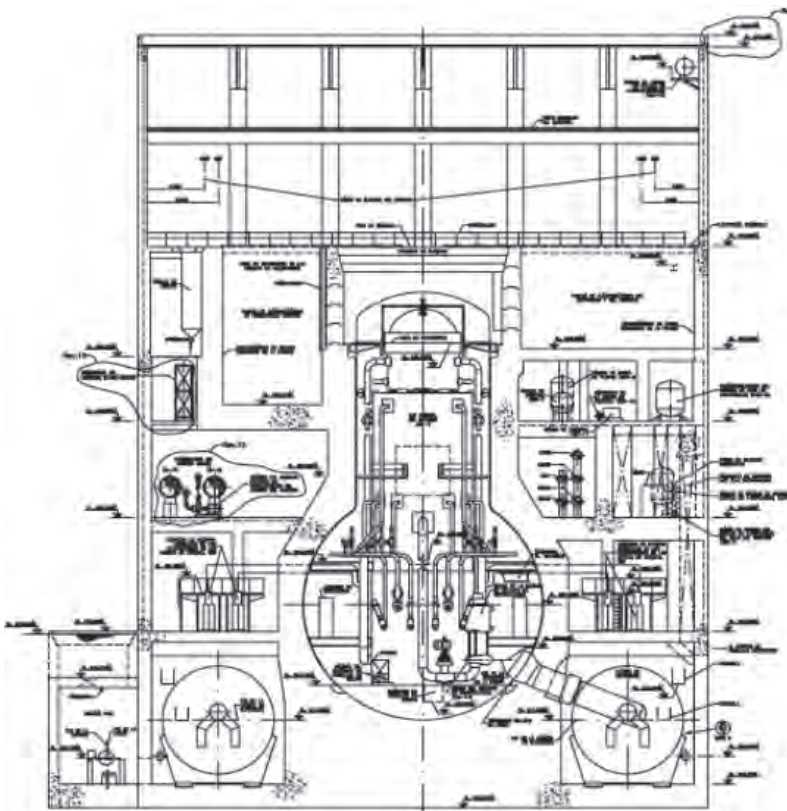


Figura 1: Vista en alzado de la Contención Primaria

de producirse un LOCA, esté asegurada la refrigeración del núcleo mediante los sistemas de seguridad.

La Contención es refrigerada mediante 5 climatizadores (HVH), cada uno de los cuales consta de una batería de frío (por donde circula el fluido refrigerante impulsado por la bomba correspondiente tras su paso por los dos grupos frigoríficos en servicio) y por un ventilador que impulsa N_2 enfriado a la atmósfera tras el intercambio con el fluido refrigerante en la batería de frío. Para enfriar de nuevo el fluido refrigerante calentado tras el intercambio de calor, se dispone de tres grupos frigoríficos (dos en servicio y uno en reserva) por cuyos condensadores circula agua procedente del sistema de agua de servicios, la cual es tomada del río Ebro, el foco frío del sistema. Puede verse un esquema del sistema en la Figura 2:

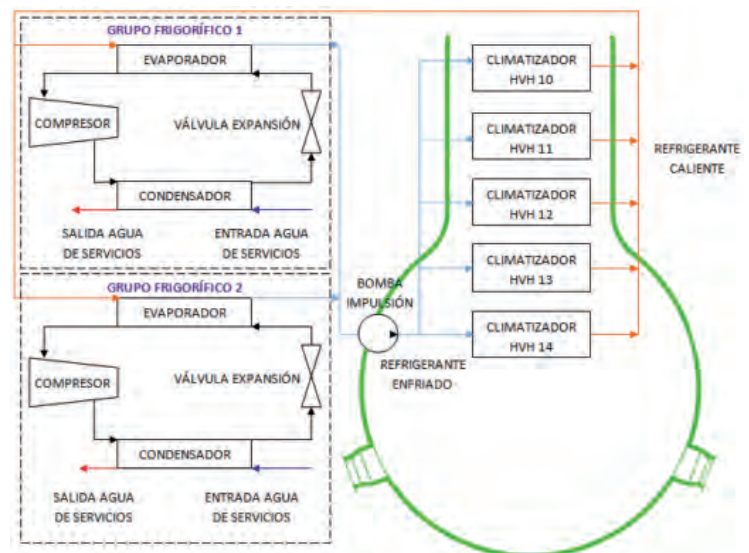


Figura 2: Esquema de refrigeración de la Contención

Desde el año 1980 en el que se sustituyeron los climatizadores originales, se han producido indisponibilidades en los mismos por diferentes motivos (rotura de correas, deterioro de rodamientos y sus soportes, ejes, etc.), lo que ha dado lugar a distintas modificaciones como son la sustitución del modelo de los rodamientos, aumento del número de correas, nuevos ejes, disminución del tensado de las correas, sustitución de dos unidades por un nuevo diseño de accionamiento directo, etc.

La indisponibilidad de dos de estos climatizadores conlleva la necesidad de reducir potencia para disminuir la carga térmica en la Contención, que tiene un límite por Especificaciones Técnicas de Funcionamiento de 58 °C, lo que implica la programación de una parada de la unidad para recuperar la disponibilidad de los climatizadores y recuperar así la plena potencia.

Actualmente, no se dispone de ningún método de predicción de esta temperatura en función de las condiciones esperadas en el foco frío y de operación, ya que las condiciones de funcionamiento operativo seguro, reguladas

en [3], simplemente recogen especificaciones para rebajar la potencia de la central cuando la temperatura de la contención primaria se aproxima a 58 °C.

Los parámetros más importantes que determinan el punto de funcionamiento del sistema de refrigeración de la Contención Primaria son la temperatura del agua de servicios, el caudal del núcleo del reactor (en adelante caudal del núcleo), el número de climatizadores en servicio y el tarado de los compresores de los grupos frigoríficos. El caudal del núcleo, encargado de extraer el calor del combustible y permitir además la variación de potencia sin el movimiento de las barras de control, es impulsado mediante las bombas del sistema de recirculación, cuyo funcionamiento supone una carga térmica para la Contención Primaria, ya que se encuentran allí alojadas. El tarado de los compresores regula la temperatura de entrada del fluido refrigerante a los climatizadores en servicio, alcanzando dicha temperatura valores más o menos próximos a la de tarado, en función de la del agua de servicios.

La predicción de la temperatura de Contención Primaria en función de tales parámetros podría realizarse a través de un modelo analítico que tuviera en cuenta todo el sistema de refrigeración de la contención. No obstante, para utilizar este modelo es necesario conocer una serie de parámetros reales (coeficientes de transmisión, película, etc.) de los cuales no se dispone, además de que el modelo sería muy complejo.

Sin embargo, se dispone de gran cantidad de datos recopilados durante los años de funcionamiento de la central. En base a estos datos, una alternativa factible para modelizar la evolución de la temperatura de la Contención Primaria es el uso de modelos de tipo polinómico (regresiones polinomiales) [4] o de redes neuronales artificiales (RNA). Estos modelos presentan la ventaja de una menor complejidad y mayor eficiencia en su computación respecto al modelo analítico antes comentado, el cual, además, necesitaría la experimentación real para validarlo.

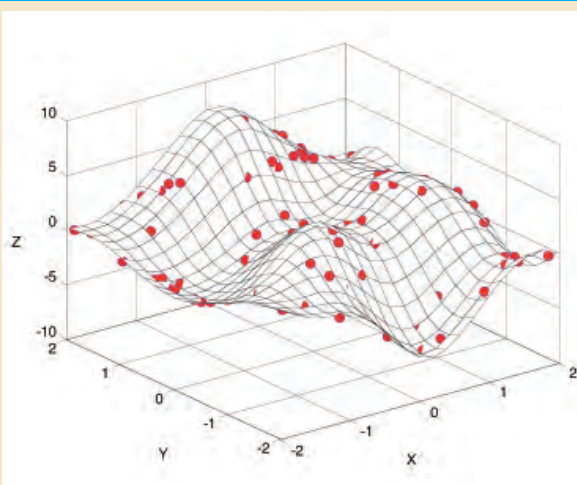
La ventaja de los primeros es que son estructuralmente

sencillos, ya que solo hay que decidir el grado del polinomio y el número de variables. Sin embargo, su desventaja es que la calidad de los modelos obtenidos depende en gran medida de la elección de las variables y del grado del polinomio, solo permiten modelizaciones de alta precisión a nivel local y su precisión no puede mejorarse añadiendo términos de orden superior porque se produciría un sobreajuste. En el caso de las RNA, su principal ventaja es que no tiene un modelo preconcebido sobre el fenómeno a estudiar, lo cual les permite una alta flexibilidad y una mejor adaptación a modelos complejos o de comportamiento global. Como a priori no se dispone de una idea clara de la complejidad del modelo que relaciona la temperatura de contención primaria con los parámetros de funcionamiento del sistema de refrigeración antes enunciados, se ha elegido a las RNA como método de modelización a usar en este estudio.

Una vez obtenido y validado el modelo a través de la RNA, se puede predecir la evolución de la temperatura de la Contención Primaria en distintas situaciones operativas como cambios de secuencia del modelo de barras de control, requeridos por la gestión del núcleo (lo que implica una variación del caudal del núcleo), variaciones del caudal del río por la gestión de los dos embalses entre los que está situada la central o predicciones de olas de calor o de frío (ambas tendrían efectos en la temperatura del agua de servicios, el foco frío del sistema), indisponibilidad de algún climatizador de la Contención o variaciones en los tarados de los compresores de los grupos frigoríficos, con lo que las ventajas operativas de tener un modelo preciso son evidentes a la hora de predecir cuál será el valor final de la temperatura de Contención tras una maniobra operativa como las descritas con anterioridad.

A la hora de implementar la red presentada en este artículo, no se ha podido aprovechar todo el potencial de la base de datos, ya que se presentan casos de funcionamiento del sistema de refrigeración de la Contención con especificaciones técnicas utilizadas actualmente, más

USO DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES



Las RNA se suelen utilizar para modelizar fenómenos complejos de los que se dispone únicamente de resultados experimentales, pero no del modelo matemático en el que se basan. En el ejemplo mostrado en la figura de este cuadro se puede ver la función de Branin de dos variables modelizada con una RNA de 8 neuronas en la capa oculta a partir de 100 experimentos generados aleatoriamente. Los experimentos usados para el entrenamiento se representan mediante círculos coloreados.

Como se puede apreciar en la distribución de los experimentos, la función es bastante compleja, pero la RNA se ajusta con gran precisión a su topología. Si se intenta realizar el ajuste de los experimentos mediante un modelo polinomial, se obtienen unos indicadores de la calidad del ajuste muy malos que indican la no idoneidad de dicho método para este caso.

eficientes a las empleadas con anterioridad. Por lo tanto, se emplea un número reducido de datos que coincide con el funcionamiento actual del sistema.

2. METODOLOGÍA

El trabajo se ha basado en la aplicación de redes neuronales artificiales para la predicción de la temperatura del *Drywell*, ya que se ha demostrado en numerosas aplicaciones de ingeniería (control de procesos, robótica, toma de decisiones, tribología, etc.) que pueden aproximar funciones con un alto grado de exactitud [5,6,7]. En el marco de las RNA, la red neuronal multicapa estática es, en la actualidad, una de las arquitecturas más utilizadas para la resolución de problemas, debido fundamentalmente a su capacidad como aproximador universal, fácil uso y comodidad [8].

Las RNA multicapa estáticas utilizadas en este trabajo constan de una capa de entrada, en la cual hay tantos nodos como variables de entrada; tiene el problema, en nuestro caso, la temperatura del agua de servicios y el caudal del núcleo (Figura 3).

A continuación de la capa de entrada, hay una o varias capas, denominadas capas ocultas (en nuestro caso hay una), formadas por las neuronas propiamente dichas. Estas neuronas están conectadas con todos los nodos o neuronas de la capa inmediatamente anterior a través de conexiones llamadas sinapsis. Las neuronas responden al modelo indicado en la ecuación (1):

$$x_j^k = f \left(\sum_{i=1}^n \omega_{ji}^k \cdot x_i^{k-1} + b_j^k \right) \quad (1)$$

Donde k representa el número de la capa, x_i^k es la salida de la neurona i de la capa k , ω_{ji}^k es el peso asignado en la neurona j de la capa k a la entrada procedente de la neurona i de la capa anterior, b_j^k es la tendencia, y el n es el número de neuronas de una capa. La función f (función de activación) de cada neurona puede ser de distintos tipos: escalón, lineal, logarítmica sigmoideal o tangente sigmoideal. Lo habitual es que todas las neuronas de una capa tengan la misma función de activación. La tendencia b desempeña un papel similar al término independiente en un polinomio, ya que permite añadir valores constantes a la salida aunque las entradas sean cero. El valor de esa entrada constante a cada neurona es 1 y el valor del peso que se le aplica b_j^k se ajusta de manera similar a los ω_{ji}^k durante el entrenamiento.

Finalmente, hay una capa de salida formada por tantas neuronas como salidas tenga la RNA. En nuestro caso, tenemos una salida, la temperatura en la Contención Primaria.

Para la elección del número óptimo de neuronas de la capa oculta, se ha partido de las recomendaciones de Lippman [9] y se ha realizado una experimentación con distintos números de neuronas hasta obtener valores de error pequeños y buena capacidad de generalización. Se ha utilizado una red

con 2 o 3 neuronas en la capa oculta, dependiendo del caso estudiado, como se verá más adelante.

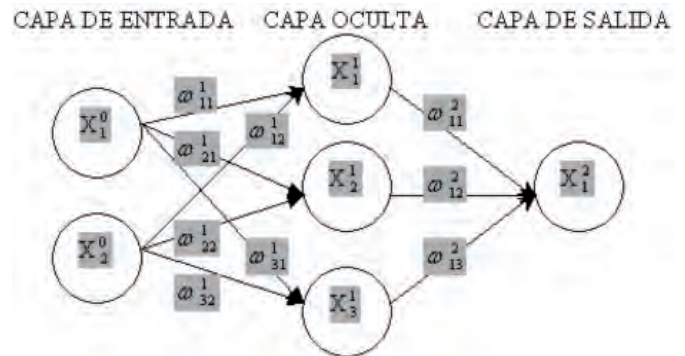


Figura 3: Arquitectura de la red diseñada

El algoritmo de aprendizaje empleado recibe el nombre de retropropagación, debido a la forma de implementar el método del gradiente para obtener los pesos óptimos de las conexiones entre neuronas, pues el error cometido en la salida de la red es propagado hacia atrás, transformándolo en un error para cada una de las neuronas ocultas [8,11]. Basándose en el error recibido, se reajustan los pesos de conexión de cada neurona, de manera que la siguiente vez que se presente el mismo patrón, la salida esté más cercana a la deseada, es decir, que el error disminuya [12].

La RNA se ha implementado en el entorno MATLAB, usando una función de activación tangente sigmoideal para la capa oculta, y una lineal para la capa de salida, y empleando el método de *Levenberg-Marquardt* como método de entrenamiento, ya que presenta una velocidad de convergencia hacia el error cuadrático medio (MSE) muy rápida, principalmente en problemas de aproximación de funciones. Dicho método emplea el concepto de la *regla Delta* generalizada y aplica el procesamiento por lotes como modo de entrenamiento. El gradiente se calcula mediante la matriz Jacobiana de los errores de las neuronas de salida, y es esta matriz la que hace que se tenga una convergencia más rápida, incluso 100 veces superior que la obtenida por el descenso por gradiente convencional [13].

Se han considerado caudales de núcleo superiores al 87% del caudal de diseño, ya que estos valores son los que resultan importantes desde el punto de vista operativo, además de considerar unas pérdidas térmicas del reactor constantes para estos valores, en torno a 0,7 MW térmicos. El caudal de agua de servicios que llega al condensador es constante en condiciones normales de funcionamiento. Se han recogido datos en situaciones donde los climatizadores HVH funcionan a su potencia nominal, reduciendo de esta manera el número de variables a introducir a la red (caudal de N_2 impulsado), ya que esa es su situación habitual de trabajo.

Cabe destacar que la temperatura de la Contención Primaria, es una media ponderada de doce temperaturas diferentes, obtenidas a partir de doce sensores colocados en

posiciones estratégicas con diferente altura y ángulo azimutal. Por lo tanto, se adaptan los datos que se introducen a la red neuronal como patrón objetivo, considerando realmente una temperatura media de la atmósfera de la Contención Primaria calculada según [14]. El caudal del núcleo se introduce en porcentaje en vez de caudal volumétrico, por ser éste un formato más útil desde el punto de vista operativo.

Los datos utilizados no se han normalizado, ya que no es estrictamente necesario, debido a la estructura de la red empleada [8] y al no darse problemas numéricos de mal condicionamiento del jacobiano durante el entrenamiento [15] que afecten a la precisión de la predicción. Si en vez de una función de transferencia lineal para la capa de salida, se hubiera empleado en su lugar, por ejemplo, una sigmoideal, hubiera sido necesario normalizar los datos introducidos como patrón objetivo (temperatura de la Contención), al estar restringida la salida de esta función al rango [0,1]. El algoritmo de entrenamiento utilizado (el método de *Levenberg-Marquardt*) es invariante respecto a la escala de los datos. Si se hubiera utilizado otro algoritmo que durante el entrenamiento hubiera dado problemas de mal condicionamiento y la precisión de la red no fuera adecuada, podría ser necesario normalizar entonces los datos introducidos como patrones de entrada (caudal del núcleo y temperatura del agua de servicios).

De la base de datos históricos de la central, se han seleccionado dos conjuntos diferentes, uno para el entrenamiento y otro para el test de la red [6,8], con los experimentos distribuidos lo más uniformemente posible. El entrenamiento representa aproximadamente en cada caso el 85 % de los datos totales, mientras que el porcentaje restante lo representa el conjunto de test. Para mejorar la generalización de la red, se utiliza la detección temprana, cogiendo para cada caso un tercer subconjunto, el de validación, que es aproximadamente un 15 % del conjunto de entrenamiento.

Para valorar la calidad de la predicción, se utilizan dos indicadores [16], el error medio relativo (R) y el coeficiente de determinación (B), aplicados al conjunto de test:

$$R = \frac{1}{s} \sum_{c=1}^s \frac{|Op_c - O_c|}{O_c} \quad (2)$$

$$B = 1 - \frac{\sum_{c=1}^s (Op_c - O_c)^2}{\sum_{c=1}^s (Op_c - O_{ave})^2} \quad (3)$$

Siendo Op_c el valor de la predicción de la red, O_c el valor medido, O_{ave} el valor medio de las mediciones, y s el número de datos para del conjunto de entrenamiento, validación o test. En teoría, valores de R próximos a 0 indican una mejor predicción de la red neuronal, así como valores de B próximos a 1.

En la figura que se muestra a continuación (Figura 4), se puede ver el proceso de construcción de la red descrita anteriormente:

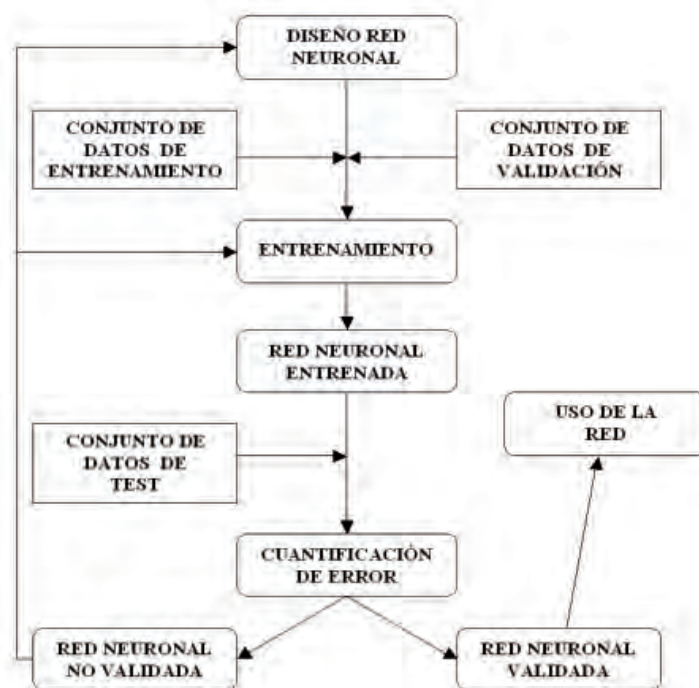


Figura 4: Proceso de construcción de una red neuronal con generalización por detección temprana

3. RESULTADOS

Se ha aplicado la red neuronal a tres casos diferentes de funcionamiento, mostrados en la Tabla 1:

Caso	Descripción
Caso 1	Funcionamiento de los 5 equipos climatizadores. Tarado de compresores a 6 °C
Caso 2	Funcionamiento de los 5 equipos climatizadores. Tarado de compresores a 4 °C
Caso 3	Funcionamiento sin el climatizador HVH 10. Tarado de compresores a 4 °C

Tabla 1: Casos de funcionamiento

Esto se traduce en la reducción de las 4 variables de entrada inicialmente previstas a 2, ya que se particulariza la situación para tres casos diferentes, donde se fija en cada uno de ellos, el tarado de los compresores y los equipos HVH en funcionamiento, es decir, se mantienen constantes estos dos parámetros.

La Tabla 2 recoge las características y el comportamiento de la red para los 3 casos citados.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Patrones usados para entrenar la red	135	33	47
Error cuadrático medio	0,11	0,01	0,04
Número neuronas en capa interna	2	2	3
Patrones usados para el test	24	5	8
Error medio relativo (%)	0,31	0,10	0,28
Coefficiente de determinación	0,91	0,90	0,94

Tabla 2: Resultados del entrenamiento y test

En primer lugar, destacan los pequeños valores del error medio relativo (todos por debajo del 0,35%). Los valores del coeficiente de determinación obtenidos también son buenos (todos por encima de 0,90) lo cual indica una buena calidad en la predicción.

La superficie de respuesta para cada caso, es diferente, notándose el efecto de la temperatura del agua de servicios

y del caudal del núcleo, especialmente a altos valores. En el caso 1 (Figura 5), el aumento se produce de manera más gradual que en el caso de funcionamiento 2 (Figura 6), donde el incremento se realiza de manera más tendida hasta valores de temperatura del agua de servicios de 21 °C, y caudal de núcleo del 94 %, a partir de los cuales, se puede observar un aumento más brusco en la temperatura de la Contención Primaria:

En el caso de funcionamiento 3 (Figura 7), el comportamiento es muy similar al otro caso de tarado de los compresores a 4°C (Figura 6), con una predicción de aumento brusco en la temperatura de la Contención Primaria para altos valores de caudal de núcleo y temperatura del agua de servicios.

Si se tiene en cuenta que el agua de servicios representa el foco frío del sistema de refrigeración, y que el compresor de cada grupo tiende a dar un valor de temperatura de fluido refrigerante próximo al que está tarado, parece evidente que

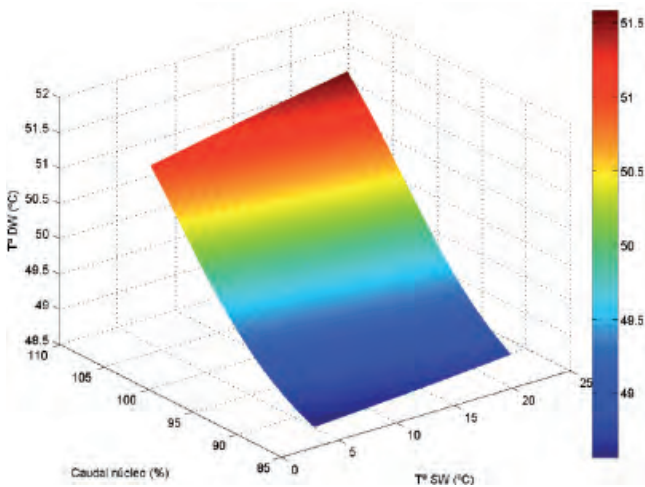


Figura 5: Predicciones de la temperatura de la Contención Primaria para el caso 1

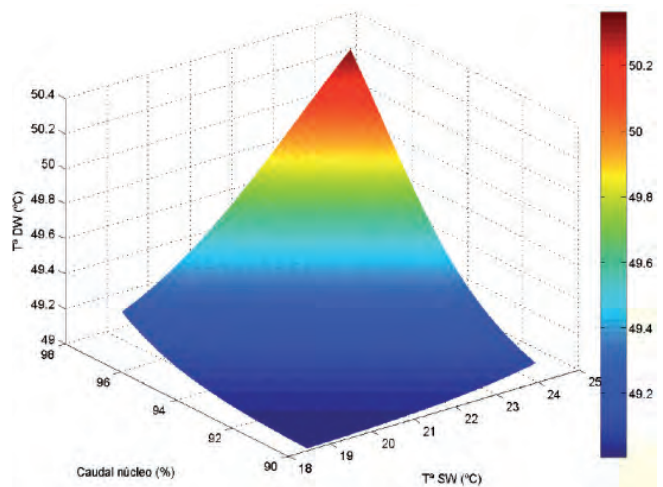


Figura 6: Predicciones de temperatura de la Contención Primaria para el caso 2

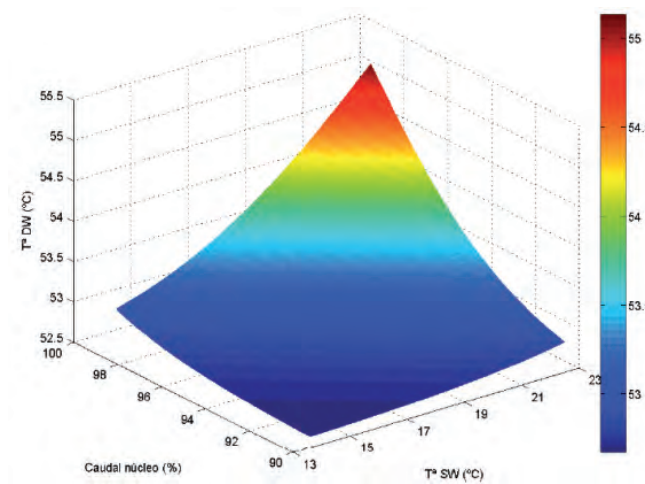


Figura 7: Predicciones de temperatura de la Contención Primaria para el caso 3

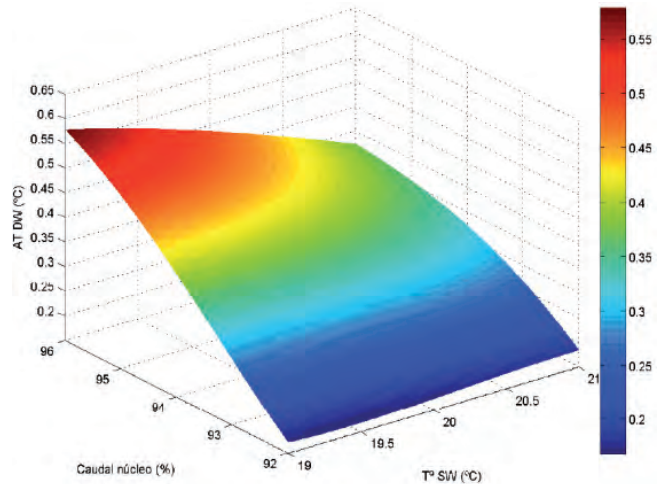


Figura 8: Predicciones para la diferencia de temperaturas en la Contención Primaria entre los casos 1 y 2

llegará a valores más próximos de esta cifra de tarado cuando el agua de servicios esté lo más fría posible. Por tanto, la diferencia de funcionamiento entre los casos 1 y 2, se acentuará para valores de temperatura del agua de servicios bajos, y viceversa (Figura 8), tendiendo a disminuir para valores altos, es decir, que las diferencias de temperatura en la Contención serán menores para valores altos de temperatura del agua de servicios.

Por otra parte, de la misma figura se puede observar como la diferencia de nivel térmico en la Contención Primaria para un valor de temperatura fijo del agua de servicios, es mayor para altos valores de caudal del núcleo, o lo que es lo mismo, para altas cargas térmicas de las bombas que impulsan el caudal al núcleo.

4. CONCLUSIONES

Las redes neuronales desarrolladas permiten aproximar con un alto grado de exactitud la temperatura que se alcanzará en la Contención Primaria, en función de la temperatura del agua del río (foco frío del sistema de refrigeración) y del caudal del núcleo, considerando el tarado de los compresores y el número de los equipos climatizadores (HVH) en funcionamiento como constantes externas en cada caso analizado. Por lo tanto, estas RNA pueden considerarse como una buena herramienta que permite la modelización del sistema en función de los parámetros citados y con la que se puede predecir, con alta fiabilidad, la respuesta del sistema ante diferentes situaciones operativas, permitiendo tomar las decisiones operacionales más adecuadas para maximizar tanto la producción energética de la central como su seguridad.

Se proporcionan 3 mapas de comportamiento, correspondientes a distintos casos de número de equipos climatizadores en funcionamiento y tarado de los compresores, que muestran la respuesta del sistema ante variaciones en la temperatura del agua del río y del caudal del núcleo, y que son de aplicación para la Central Nuclear de Sta. María de Garoña, pero se trata de un método que podría aplicarse a otras centrales nucleares, adaptándolo evidentemente a los datos históricos de cada una.

Los modelos obtenidos permiten hacer una predicción de alta precisión con mucha antelación ante situaciones de funcionamiento comunes y es compatible con las condiciones de funcionamiento seguro ya existentes que seguirían actuando en situaciones fuera del rango para el que están entrenadas las RNA. Esta antelación que permiten las RNA, encaja muy bien con la velocidad de respuesta de las centrales nucleares, en las que no es posible variar bruscamente la potencia de manera instantánea, lo que permitiría hacer trabajar a la central cerca de su óptimo durante más tiempo y con más seguridad.

Según los resultados obtenidos, en función de la indisponibilidad del equipo HVH 10, la red prevé alcanzar temperaturas por encima de los 55 °C, para temperaturas del agua de servicios superiores a 21 °C, y valores de caudal del

núcleo próximos 100 %.

Dentro de los rangos de trabajo estudiados, no se prevé alcanzar en este caso la temperatura límite en operación normal, aunque no se podría descartar alcanzarla para secuencias de operación que impliquen valores de caudal superiores.

Para las otras situaciones operativas expuestas (casos 1 y 2), no se prevé alcanzar la temperatura límite en operación normal, ya que se han presentado predicciones que distan bastante de ese valor, incluso para rangos de trabajo de temperaturas del agua de servicio y caudal del núcleo altos.

Para un funcionamiento con los 5 equipos climatizadores disponibles, se recomienda bajar el tarado de los compresores de los grupos frigoríficos de 6 a 4 °C, para los casos donde el caudal del núcleo sea superior al 93 %, y se requiera disminuir la temperatura en la Contención.

No obstante, si la temperatura del agua de servicios fuera muy elevada, podría no provocar mucho efecto el cambio de tarado en la temperatura de la Contención.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Nuclenor, S.A. la concesión de una beca para realizar prácticas en sus instalaciones de Santa María de Garoña (Burgos), lo que permitió el desarrollo de este trabajo.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Glasstone S, Sesonske A. *Ingeniería de reactores nucleares*. Carreira M (trad). Barcelona: Editorial Reverté S.A., 1990. 908p. ISBN: 84-291-4035-2.
- Nuclenor. Estudio de Seguridad. Revisión 37. 2010.
- Nuclenor. Especificaciones Técnicas de Funcionamiento de la Central Nuclear de Sta. M^a de Garoña. 1986.
- Eubank RL. *Nonparametric Regression and Spline Smoothing*. 2ª edición. New York: Marcel Dekker, 1999. 360p. ISBN 0-8247-9337-4.
- Lewis FL. "Neural network control of robots manipulators". *IEEE Expert*. 2002. Vol.11-3 p.64-75.
- Bendaña-Jácome R, del Caño-Gochi A, de la Cruz-López P et Al. "Selección multicriterio de contratistas de obras. Enfoque basado en redes neuronales". *DYNA Ingeniería e Industria*. 2010 Vol.85-1 p.71-84.
- Zhang Z, Friedrich K, Velten K. "Prediction on tribological properties of short fibre composites using artificial neural networks". *Wear*. 2002. Vol.252-7 p.668-675.
- Isasi-Viñuela P, Galván-León I. *Redes de Neuronas Artificiales. Un Enfoque Práctico*. Madrid: Pearson - Prentice Hall, 2004. 248p. ISBN: 978-84-205-4025-2.
- Lippman RP. "An introduction to computing with Neural Networks". *IEEE ASSP Magazine*. 1987. Vol.3-4 p.4-22.
- Freeman A, Skapura DM. *Redes neuronales. Algoritmos, aplicaciones y técnicas de programación*. García-Bermejo R (trad). Madrid: Addison-Wesley Iberoamericana, 1993. 431p. ISBN: 0-201-60115-X.
- Zeidenberg M. *Neural networks in artificial intelligence*. 2ª edición. New York: Ellis Horwood Limited, 1990. 268p. ISBN: 0-13-612185-3.
- Hilerá-González JR, Martínez-Hernando VJ. *Redes neuronales artificiales. Fundamentos, modelos y aplicaciones*. Madrid: RA-MA Editorial, 1995. 390p. ISBN: 84-7897-155-6.
- Hagan MT, Menhaj M. "Training feedforward networks with the Marquardt algorithm," *IEEE Transactions on Neural Networks*. 1994. Vol.5-6 p.989-993.
- Nuclenor. Prueba de Vigilancia. Determinación de la temperatura de la atmósfera de la Contención Primaria. 1986.
- *Should I normalize/standardize/rescale the data?* [en línea]. Warren Sarle. Febrero 2011 [Marzo 2011]. Disponible en internet: <http://www.faqs.org/faqs/ai-faq/neural-nets/part2/section-16.html>.
- Zhu J, Shi Y, Feng X et al. "Prediction on tribological properties of carbon fiber and TiO₂ synergistic reinforced polytetrafluoroethylene composites with artificial neural networks". *Materials and Design*, 2009. Vol.30-4 p.1042-1049.

Asignación de propiedades mecánicas en imagen médica



Alberto Higuera-Garrido *

Pablo Pando-Cerra *

Aquilino Osorio-Zapico *

María Dolores García-López **

Dr. Ingeniero Industrial

Dr. Ingeniero Industrial

Dr. Ingeniero de Minas

Diplomada Universitaria en Enfermería

* Universidad de Oviedo. Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación. Campus de Viesques - 33204 Gijón. Tfno: +34 985 181923. higueraalberto@uniovi.es, pandopablo@uniovi.es, aosorio@uniovi.es

** Hospital de Cabueñes. Camino de Cabueñes s/n - 33203 Gijón. Tfno: +34 985 181948. cotlola@yahoo.es

Recibido: 28/09/2010 • Aceptado: 15/11/2010

Mapping of mechanical properties in medical imaging

ABSTRACT

• Introduction.

Current DICOM viewers and their ability to generate three-dimensional reconstructions generate a high interest in engineering application in the analysis by the Finite Element Method (FEM) and in mechanical simulations of real bone. The ability to quantify the mechanical properties from medical imaging is useful in the fields of implant design as so as surgical navigation and planning.

Material and Methods.

To achieve this objective it is necessary to infer the mechanical properties of tissues in terms of the generated medical image. Different methods are evaluated on the basis of their advantages and disadvantages and the results produced by each of them. Finally, a bone structure is isolated in terms of its mechanical properties, showing areas with better structural quality, and those with better capacity for bone regeneration.

Results.

Several methods have ranges of divergence with a magnitude that makes them unreliable for use in engineering, the divergence was evident in terms of image acquisition system, patient and diagnosis protocol used.

Conclusions.

The most reliable method, within the wide discrepancies observed, requires the use of patterns in the process of image acquisition to facilitate the determination of mechanical properties related to pattern values.

- **Keywords:** medical imaging, three-dimensional reconstruction, bulk density, finite element method, bone tissue, mechanical properties.

RESUMEN

Introducción.

Los visores actuales de DICOM y su capacidad para generar reconstrucciones tridimensionales generan en los ingenieros un elevado interés en su aplicación en la realización de análisis por el método de los elementos finitos (MEF), así como simulaciones mecánicas del tejido óseo real.

La posibilidad de cuantificar las propiedades mecánicas a partir de imágenes médicas resulta de gran utilidad en los campos del diseño de implantes, así como de navegación y de planificación quirúrgica.

Material y Métodos.

Para conseguir este objetivo, es necesario poder inferir las propiedades mecánicas de los tejidos en función de la imagen médica que generen.

Se valoran diferentes métodos atendiendo a sus ventajas e inconvenientes, así como a los resultados arrojados por cada uno de ellos.

Finalmente se aísla una estructura ósea en función de las propiedades mecánicas de la misma, pudiendo apreciarse las zonas con mejor calidad estructural y aquellas con mejor capacidad para la regeneración ósea.

Resultados.

Los diversos métodos empleados presentan rangos de divergencia con una magnitud que los hace poco fiables para su empleo en la ingeniería, siendo evidente la variación en función del sistema de adquisición de imagen, el paciente y el protocolo de diagnóstico empleado.

Conclusiones.

El método más fiable, dentro de la amplia divergencia detectada, requiere el uso de patrones durante el proceso de

adquisición de las imágenes que facilitan la determinación de las propiedades mecánicas relativas a los valores patrón.

Palabras clave: imagen médica, reconstrucción tridimensional, densidad aparente, método de elementos finitos, tejido óseo, propiedades mecánicas.

1. INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista de la ingeniería, uno de los mayores atractivos de la imagen médica es poder determinar, a través de la información que ésta aporta, los valores de los coeficientes visco-elásticos que permiten al ingeniero caracterizar el tejido (Jiao, et al, 2009), predecir su comportamiento y realizar reconstrucciones por el método de los elementos finitos (Wirtz, et al, 2003).

La complejidad de la estructura del cuerpo humano obligará a realizar simplificaciones en el comportamiento de los tejidos que permitan su estudio con las capacidades computacionales actuales. Estas simplificaciones se han ido reduciendo a medida que los computadores lo han permitido, así el hueso ha evolucionado de un supuesto comportamiento isótropo a estudios en los que se le ha asignado un comportamiento ortótropo. También se ha logrado diferenciar el comportamiento del hueso trabecular frente al cortical, si bien a favor de la practicidad se asemeja el hueso trabecular al cortical pero modificando sus coeficientes, pues, a nivel microscópico, las propiedades del hueso cortical y trabecular son similares (Carter, et al, 1977).

Las estimaciones de las propiedades mecánicas de los tejidos del cuerpo humano son fundamentales para predecir el comportamiento de implantes, así como para conocer la calidad del hueso de un paciente y su composición (Ohnishi, 2009). Es así mismo un paso básico previo a cualquier simulación mediante el método de los elementos finitos.

Los valores que se asocian a los diferentes tipos de tejidos varían en un amplio rango según los autores del estudio considerado: esto es debido a la dificultad, si no imposibilidad, a la hora de realizar medidas en tejido vivo. La mayor parte de los estudios realizados se efectúan con tejidos no vivos alterando significativamente las propiedades de los mismos. Otra línea actual de investigación aplica los avances en imagen médica para poder determinar las propiedades de estos elementos. Como se ha visto, existe una relación entre unidades *Hounsfield* y densidad (Weaver, et al, 1966) y del mismo existe una relación entre densidad y propiedades mecánicas (Ulrich, et al, 1999), si bien ésta es más compleja que la lineal existente entre las unidades *Hounsfield* (HU) y densidad.

Conocer las propiedades de un tejido permitirá conocer su comportamiento bajo carga y valorar su resistencia bajo esfuerzo (Imai, et al, 2008), así como determinar secuelas de alteraciones patológicas, monitorizar recuperaciones y predecir posibles fracturas.

Existe un amplio conocimiento de las propiedades de las diversas aleaciones metálicas, poliméricas y cerámicas

disponibles en la ingeniería que permite su estudio y simulación mediante el método de los elementos finitos, estudio que capacita al ingeniero para optimizar el diseño de un implante, conociendo su resistencia a fatiga y a cargas. Si bien es evidente que en una unión metal-hueso la parte marcadamente más débil es el hueso, por lo que poder conocer su comportamiento es esencial para el éxito de cualquier implante.

La valoración correcta de todos los coeficientes que permiten la simulación mecánica del hueso dota a la ingeniería de la capacidad de realizar estudios más reales y más precisos sobre la evolución y comportamiento de cualquier tipo de implante. Actualmente el método más fiable de conocer las propiedades del hueso de un paciente es mediante un estudio de imagen médica, pues suponer unos valores estándar en tejidos patológicos no sólo es arriesgado, sino injustificable; si bien en casos generales, en los que existe suficiente stock óseo, sí se pueden aceptar como válidos los valores recogidos por la literatura científica, siempre aplicando el adecuado margen de seguridad.

Con unos coeficientes adecuados se puede determinar, mediante el método de los elementos finitos, la transferencia de cargas al hueso, así como los puntos críticos de máximo esfuerzo y el valor que éste alcanza. Permitiendo de esta manera que el ingeniero pueda rediseñar el implante para obtener los resultados más apropiados al caso objeto de estudio.

El método de los elementos finitos es también aplicable al seguimiento y evolución del tejido que se esté considerando, pues permite predecir, con las actuales propiedades del tejido, su comportamiento en cada momento. No se debe olvidar que los tejidos están vivos y modifican sus propiedades a lo largo del tiempo, pudiendo verse sorprendido el ingeniero ante el fracaso de un implante donde inicialmente existía un stock óseo importante y de calidad.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El objetivo del presente trabajo es el estudio de diferentes métodos de asignación de propiedades mecánicas basados en imagen médica, comparando sus resultados, estudiando su validez, proponiendo finalmente aquel o aquellos que permitan una asignación más adecuada y realizando segmentaciones de estructuras en función de sus propiedades mecánicas que demuestren su aplicación.

2.1. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL TEJIDO ÓSEO

2.1.1. Determinación de la densidad aparente del tejido óseo.

Fundamentos biológicos de la resistencia ósea.

La conducta biomecánica del cuerpo humano es determinada por huesos, cartílagos, ligamentos, tendones, músculos y otros tejidos conjuntivos. Estos elementos se clasifican como estructuras activas o pasivas dependiendo de

si producen o no fuerzas. Los huesos se consideran estructuras pasivas y constituyen la mayoría del esqueleto. La matriz ósea es un material compuesto formado por una componente orgánica (aprox. 65%), otra inorgánica (aprox. 20%) y agua (aprox. 10%), estos valores varían dependiendo del tipo de hueso. La matriz orgánica está constituida aproximadamente por 95% de fibras de colágeno reforzadas por depósitos de calcio y sales de fosfato en forma de hidroxapatita (Cowin, 1989). Los depósitos de calcio y fosfato son los que le proporcionan dureza, rigidez y resistencia al hueso, mientras que las fibras de colágeno son las que proporcionan flexibilidad. La componente orgánica le da forma al hueso y contribuye a la capacidad de resistir a la tracción, mientras que la componente inorgánica o mineral contribuye a la resistencia a la compresión. Los huesos desmineralizados (ligamentos o tendones) son flexibles y resistentes a la tracción. La porosidad se define como el volumen de vacío por unidad de volumen de hueso, y representa la parte proporcional del hueso ocupado por médula ósea o material no-mineralizado que se encarga de la irrigación del hueso. El hueso compacto tiene una porosidad de aproximadamente 5 a 30% mientras que la porosidad del hueso trabecular es aproximadamente 30 a 90%.

Observación diagnóstica del tejido ósea.

En la tecnología de imagen basada en la Tomografía Axial Computarizada (TAC) se realizan una serie de medidas de la atenuación fotónica en cada punto a lo largo de la línea mediante la rotación de emisor y receptor en torno a ese punto. De ese modo cada punto es observado desde múltiples direcciones y, mediante el proceso matemático de reconstrucción de la proyección, se aísla cada punto de la línea. La repetición de este proceso a través de diversas líneas genera la imagen axial bidimensional que conforma cada capa del TAC. Este proceso de reconstrucción genera una imagen en la que se representa los coeficientes de atenuación de los rayos X en los diversos tejidos que conforman una sección del cuerpo humano. Estos coeficientes pueden ser empleados para determinar la densidad del tejido en cualquier punto de la imagen.

En los escáneres TAC actuales, los puntos a lo largo de la línea varían en número y tamaño dependiendo del objeto que se esté estudiando. Generalmente el tamaño se mueve en un rango que abarca desde los 0,25 hasta los 1,5mm y el número de puntos en cada sección se corresponde con los elementos de una matriz de 512 por 512 elementos, siendo ya raros los estudios de 256 por 256.

Así pues, cada elemento que conforma la imagen TAC es una representación del coeficiente de atenuación del tejido frente a los rayos X, de su posición en el espacio y de su tamaño.

Problemática de la observación mediante TAC.

El uso de las unidades *Hounsfield* para representar los valores de los coeficientes de atenuación presenta el problema de no ser comparable entre diferentes aparatos TAC, pues la escala basada en las referidas unidades se define a partir de la atenuación de dos tejidos (aire y agua) a 25°C y a la

energía de trabajo del aparato, con lo que diferentes aparatos presentarán diferentes valores al trabajar a distintas energías. De este modo la escala *Hounsfield* variará de un dispositivo TAC a otro, e incluso en el mismo dispositivo TAC si se varía la energía con la que se realiza la adquisición. Es por ello que los resultados expresados en HU no pueden ser comparados directamente entre dispositivos TAC distintos.

Dos de las principales limitaciones de los dispositivos TAC residen por un lado en la necesidad de conocer la fiabilidad de la representación de la atenuación mediante las unidades *Hounsfield*, si bien **Cann** (Cann, 1988) establece que, para una región suficientemente amplia, la variación de los números *Hounsfield* se ajusta a una distribución gaussiana, y por otro lado en la interpolación de volúmenes entre vóxeles adyacentes.

Si se mezcla un material con una densidad ligeramente diferente dentro del primero, el material se convierte en heterogéneo, pudiendo presentarse dos situaciones:

1. El material añadido está compuesto por partículas mayores que la resolución espacial del dispositivo TAC: entonces se podrá apreciar una separación discreta entre ambos materiales.
2. El material añadido está compuesto por partículas menores que la resolución espacial del dispositivo TAC: en este caso se producirían errores por interpolación de volúmenes, obteniendo un resultado similar al de un material homogéneo, pero con una desviación más amplia centrada en el valor HU medio.

Ambas problemáticas son comunes a todos los estudios de densitometría realizados con TAC.

Medición de la densidad mediante TAC.

La precisión en la medida de la densidad mineral del hueso con técnicas de imagen TAC depende de dos factores principalmente, uno físico y otro fisiológico:

1. El valor de las unidades *Hounsfield* asignado a un elemento de volumen debe ser preciso y comprobado con un material similar suficientemente conocido. Este factor depende del escáner TAC empleado y de la precisión con la que ajuste los valores de cada elemento a la escala de *Hounsfield*.
2. El hueso trabecular está formado por diferentes componentes, mientras que no todos los aparatos TAC pueden valorar componentes con diferentes coeficientes de atenuación si sus propiedades materiales no son previamente conocidas.

Otro factor que puede ser fuente de errores en el estudio es la interpolación del elemento que, más que un error técnico, se considera un error de interpretación de los datos. Considerando un escáner TAC ideal en el que el rayo de fotones está perfectamente colimado, el error de interpolación se puede deber al incorrecto posicionamiento del volumen respecto al eje del rayo (Fig. 1 A y B) o a un espesor de capa inadecuado (Fig. 1 C y D).

El estudio de un elemento que no se encuentra centrado respecto a la circunferencia de escaneado presentará

resultados diferentes de atenuación según el punto desde que se esté emitiendo el rayo (Fig. 1 A y B).

El estudio de un elemento que es más estrecho que el espesor de capa, presentará en la imagen final un valor HU que representará el valor de la atenuación media que el elemento y el material que le rodean aportan, considerando ponderadamente la aportación de cada uno. La única manera de evitar este efecto es reducir el espesor de capa hasta el punto en el que el elemento se encuentre totalmente contenido en el campo del rayo (Fig. 1 C y D).

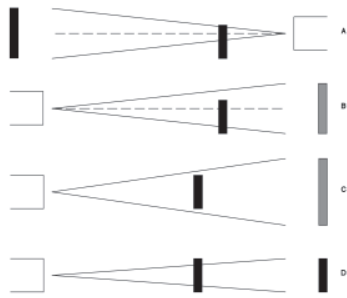


Fig. 1: Errores de interpolación en la valoración de la densidad ósea

A la hora de determinar la densidad de un tejido óseo es importante constatar que las propiedades del mismo varían notablemente entre hueso cortical y hueso trabecular. La estructura del hueso trabecular es más parecida a una espuma plástica, en estos materiales la densidad aparente es el factor más importante para concretar las propiedades mecánicas de los mismos (Patel, 1969).

Densidad aparente.

Las propiedades mecánicas del tejido óseo son modeladas en función de la densidad aparente del tejido, ρ_{ap} , definida como la masa de tejido mineralizado dividido por el volumen total, incluyendo el de los poros.

La determinación de la densidad aparente a partir de una imagen TAC se realiza mediante la corrección de la curva de calibración, asignando una densidad aparente nula a la fase medular y una densidad aparente de 2g/cm³ a la máxima densidad del tejido cortical (Taylor, et al, 2002). Para corregir la curva se obtienen los valores en unidades *Hounsfield* que representan en la imagen los puntos objetos de estudio, fase medular y cortical, (Fig. 2) y se formula la ecuación explícita de la recta (Ec. 1) que permitirá obtener la densidad aparente de los puntos contenidos en la imagen:

$$\rho_{ap} = a \cdot HU + b \tag{1}$$

Asignando una densidad aparente de valor cero a la correspondiente a la fase medular y conociendo el valor de las unidades *Hounsfield* de esa región (HU_{med}):

$$\rho_{ap} = 0 \rightarrow HU = HU_{med} \tag{2}$$

Asignando una densidad aparente de valor dos a la correspondiente a la fase cortical y conociendo el valor de las unidades *Hounsfield* de esa región (HU_{cort}):

$$\rho_{ap} = 2 \rightarrow HU = HU_{cort} \tag{3}$$

Estudiando la ecuación de la recta en los dos puntos referidos (medular y cortical) se obtienen los valores de los parámetros *a* y *b* que definen la ecuación explícita de la recta:

$$\rho_{ap} = 0 = a \cdot HU_{med} + b \rightarrow a = -\frac{b}{HU_{med}} \tag{4}$$

$$\rho_{ap} = 2 = a \cdot HU_{cort} + b \rightarrow 2 = -\frac{b}{HU_{med}} \cdot HU_{cort} + b \tag{5}$$

$$b = \frac{2 \cdot HU_{med}}{HU_{med} - HU_{cort}} \tag{6}$$

$$a = \frac{2}{HU_{cort} - HU_{med}} \tag{7}$$

De las ecuaciones (1), (6) y (7):

$$\rho_{ap} = \frac{2}{HU_{cort} - HU_{med}} \cdot HU + \frac{2 \cdot HU_{med}}{HU_{med} - HU_{cort}} \tag{8}$$

Ecuación que relaciona la densidad aparente de un tejido con su correspondiente valor HU y que se representa mediante la corrección de la curva de calibración (Fig. 2 Corrección de la curva de calibración). La gráfica permite realizar una estimación entre las unidades *Hounsfield* medidas y su correlación con la densidad aparente del tejido objeto de estudio

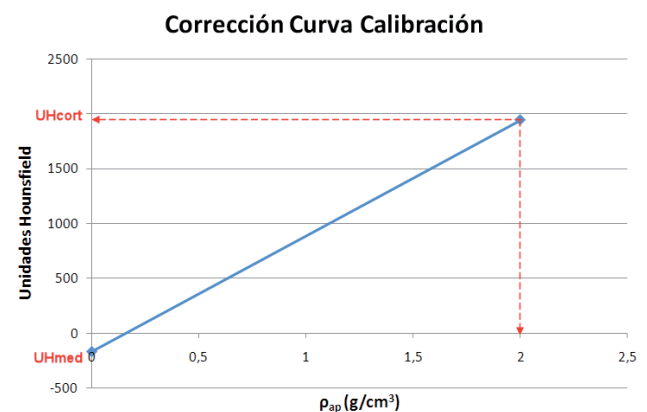


Fig. 2: Corrección de la curva de calibración

Si bien para obtener un valor más exacto de la densidad del tejido se debe utilizar un estudio TAC con patrones calibrados de densidad. Dichos patrones pueden consistir en

cilindros presentes durante la adquisición de imágenes cuya densidad sea conocida. Con los valores HU correspondientes a cada cilindro se puede obtener la densidad que representan y trazar la curva de calibración ajustada al caso concreto.

La recomendación del uso de cilindros como patrones es debida a la distorsión en los valores de las unidades *Hounsfield* que en algunos casos se constataron en la imagen TAC de los vértices en diseños poligonales. El patrón cilíndrico mostró mayor uniformidad en sus valores HU en la imagen TAC.

2.1.2. Determinación del módulo de Young del tejido óseo

El esfuerzo de fractura está relacionado con el contenido de mineral del hueso y es independiente de la edad y el género del paciente (Weaver, et al, 1966), siendo positiva la relación entre la densidad aparente del hueso, el esfuerzo a compresión y el módulo de elasticidad (Mc. Elhaney, et al, 1970).

La relación entre la densidad aparente y el módulo de Young la establece la siguiente ecuación (Carter, et al, 1977):

$$E = E_c \cdot \varepsilon^{0,006} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_c}\right)^3 \tag{9}$$

Siendo E_c el módulo de elasticidad a compresión del hueso compacto (22GPa (Zannoni, et al, 1998)), ρ_c la densidad del mismo (1,73g/cm³) y tomándose una velocidad de deformación ($\dot{\varepsilon}$) unitaria, con lo que:

$$E = 4249 \frac{GPa}{\left(\frac{g}{cm^3}\right)^3} \cdot \rho^3 \tag{10}$$

Si bien, para hueso trabecular, se ajusta mejor la relación

aportada por la ecuación (Rice, et al, 1988): (11)

$$E = 0,06 \cdot 2,49 \cdot \rho^2 - 1,59 \cdot \rho^2 - 1,04 \cdot \rho^2 \cdot D + 0,75 \cdot \rho^2 \cdot T$$

Siendo D=1 para la dirección transversal, D=0 para la dirección longitudinal, T=1 para esfuerzos de tracción, T=0 para esfuerzos de compresión.

La literatura científica aporta diversos valores para los coeficientes de elasticidad que corresponden al hueso humano. En la Tabla I (Muller-Karger, et al, 2001) se recogen los valores del módulo de Young que diversos autores han propuesto, la dirección Z es la longitudinal del hueso.

Se puede apreciar en la Tabla I la gran discrepancia en los valores propuestos por los diferentes autores con variaciones de hasta un 272%, lejos de los rangos prácticos aplicables en la ingeniería.

2.1.3. Determinación del coeficiente de rigidez transversal del tejido óseo

El coeficiente de rigidez transversal se determina (Rubin, et al, 1993) según las ecuaciones:

$$G_{12,i} = G_{12,max} \frac{\rho_{ap,i}^2}{\rho_{ap,max}^2} \tag{12}$$

$$G_{13,i} = G_{13,max} \frac{\rho_{ap,i}^2}{\rho_{ap,max}^2} \tag{13}$$

$$G_{23,i} = G_{23,max} \frac{\rho_{ap,i}^2}{\rho_{ap,max}^2} \tag{14}$$

Siendo ρ_{ap} la densidad

Autores	Reilly y Burstein (1975)	Yoon y Katz (1976)	Knets (1978)	Ashman et al (1984)
Hueso	Fémur	Fémur	Tibia	Fémur
Método de Medición	Pruebas mecánicas	Ultrasonido	Pruebas mecánicas	Ultrasonido
Comportamiento Óseo	Transversalmente Isotrópico	Transversalmente Isotrópico	Ortotrópico	Ortotrópico
Ex (GPa)	11.50	18.80	6.91	12.00
Ey (GPa)	11.50	18.80	8.51	13.40
Ez (GPa)	17.00	27.40	18.40	20.00

Tabla I: Diversos valores del módulo de Young

Autores	Reilly y Burstein (1975)	Yoon y Katz (1976)	Knets (1978)	Ashman et al (1984)
Hueso	Fémur	Fémur	Tibia	Fémur
Método de Medición	Pruebas mecánicas	Ultrasonido	Pruebas mecánicas	Ultrasonido
Comportamiento Óseo	Transversalmente Isotrópico	Transversalmente Isotrópico	Ortotrópico	Ortotrópico
Gxy (GPa)	3.60	7.17	2.41	4.53
Gxz (GPa)	3.28	8.71	3.56	5.61
Gyz (GPa)	3.28	8.71	4.91	6.23

Tabla II: Diversos valores del coeficiente de rigidez transversal

Autores	Reilly y Burstein (1975)	Yoon y Katz (1976)	Knets (1978)	Ashman et al (1984)
Hueso	Fémur	Fémur	Tibia	Fémur
Método de Medición	Pruebas mecánicas	Ultrasonido	Pruebas mecánicas	Ultrasonido
Comportamiento Óseo	Transversalmente Isotrópico	Transversalmente Isotrópico	Ortotrópico	Ortotrópico
xy	0.58	0.312	0.488	0.376
xz	0.31	0.193	0.119	0.222
yz	0.31	0.193	0.142	0.235
yx	0.58	0.312	0.622	0.422
zx	0.46	0.281	0.315	0.371
zy	0.46	0.281	0.307	0.350

Tabla III: Diversos valores del coeficiente de Poisson

aparente, i el índice del material, max el valor máximo para la propiedad y el material; y $\rho_{ap,max}$ la densidad aparente máxima del hueso.

En la Tabla II (Muller-Karger, et al, 2001) se recogen los valores del coeficiente de rigidez transversal propuesto por diversos autores, la dirección Z es la longitudinal del hueso.

2.1.4. Coeficiente de Poisson

Los valores del coeficiente de *Poisson* se encuentran abundantemente recogidos por la literatura científica, proponiéndose entre otros los valores de la Tabla III (Muller-Karger, et al, 2001).

Si bien el uso de un valor de 0,3 para el coeficiente de *Poisson* está ampliamente aceptado (Couteau, et al, 1998) y recogido en diversos estudios (Hobatho, et al, 1991).

2.2. GENERACIÓN DE MODELOS 3D Y ASIGNACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS

Los dispositivos de adquisición de imagen médica almacenan la información estrictamente gráfica mediante unos valores, denominados unidades *Hounsfield*, proporcionales al coeficiente de atenuación fotónica de los



Fig. 3: Rangos de densidades aparentes para un fémur

tejidos. La lectura de estas unidades y su manipulación en rangos de magnitudes similares (Fig. 3) permite la asignación de valores de densidad aparente a los diversos puntos que, tridimensionalmente, conforman la anatomía humana.

En la Fig. 3 se puede apreciar cómo es factible aislar tejidos óseos en función de su densidad aparente mediante sencillas técnicas de segmentación (selección de rangos de unidades *Hounsfield*) y obteniendo de esta manera modelos tridimensionales de estructuras con comportamiento mecánico afín. En la referida figura el sólido azul representa el tejido trabecular, mientras que el amarillo se corresponde con el cortical y el verde y rojo con las paredes externas e internas de la estructura cortical.

A partir de esta densidad aparente, y mediante las fórmulas propuestas, es sencillo definir cada punto con sus propiedades mecánicas (Fig. 4) permitiendo su manejo en aplicaciones de simulación mecánica y/o de análisis por el método de los elementos finitos.



Fig. 4: Fémur segmentado en función de sus propiedades mecánicas

En la Fig. 4 se aprecia el modelo volumétrico basado en la segmentación mostrada. En este caso el modelo

contiene, para cada elemento de observación del mismo, la información de su posición en tres dimensiones así como la densidad aparente asociada en función de su correlación con su valor de unidades *Hounsfield*.

El modelo mostrado permite apreciar claramente aquellas regiones con stock óseo de mayor calidad y aquellas en las que las propiedades mecánicas son inferiores, posibilitando tanto a ingenieros como a cirujanos conocer no sólo la estructura ósea sino también la calidad de la misma.

3. CONCLUSIONES

La correcta interpretación y lectura de los datos presentes en las imágenes médicas obtenidas mediante determinados dispositivos de adquisición de imagen puede permitir la asignación precisa de propiedades mecánicas a los tejidos óseos. La actual precisión de estos dispositivos posibilita la observación de volúmenes en el rango de los 0.016 mm³ de manera que se pueden asignar propiedades con esa exactitud posicional. Así mismo es factible establecer correlaciones entre la densidad aparente y el comportamiento mecánico del tejido.

La exportación de estructuras tridimensionales con referencia a las propiedades mecánicas calculadas permite la obtención de modelos anatómicos 3D sobre los que se pueden realizar simulaciones mecánicas.

Mediante la correlación entre la densidad aparente y las propiedades mecánicas de los tejidos óseos, se pueden generar modelos tridimensionales válidos para análisis por el método de los elementos finitos.

Para reducir la divergencia de resultados arrojada por la aplicación de las diferentes formulaciones es aconsejable el uso de patrones de densidad a la hora de realizar el TAC (Trabelsi, et al, 2009), de manera que no sea necesaria una curva de calibración, generalmente inexistente o no disponible. De esta manera también se evita la arriesgada suposición realizada en el método de curva de calibración por el que todas las corticales y las fases trabeculares poseen la misma densidad aparente.

De igual manera la amplia variación presente en los diferentes valores propuestos por diversos autores (hasta un 272%) recomienda el uso de las técnicas de asignación de propiedades basadas en TAC de una manera más cualitativa que cuantitativa.

4. AGRADECIMIENTOS

Proyecto realizado dentro del Programa de Fomento de la Investigación Técnica del Ministerio de Industria Comercio y Turismo.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Cann CE. 1988. Quantitative CT for Determination of Bone Mineral Density: A Review. *Radiology*, 166, p.509-22.
- Carter DR, Hayes WC. 1977. The compressive behavior of bone as a two-phase porous structure. *Journal of Bone & Joint Surgery (Am)*, 59, p.954-62.
- Couteau B, Hobatho MC, Darmana R, et al. 1998. Finite element modelling of the vibrational behavior of the human femur using CT-based individualized geometrical and material properties. *Journal of Biomechanics*, 31, p.383-86.
- Cowin S. 1989. *Bone Mechanics*. Florida USA: CRC Press Inc.
- Hobatho MC, Damana R, Pastor P, et al. 1991. Development of a three dimensional finite element model of a human tibia using experimental modal analysis. *Journal of Biomechanics*, 24, p.371-83.
- Imai K a, Ohnishi I a, Yamamoto S b, et al. 2008. In vivo assessment of lumbar vertebral strength in elderly women using computed tomography-based nonlinear finite element model. *Spine*, 33(1), p.27-32.
- Jiao C a, Hong D a, Lu H a, et al. 2009. 3D finite element model for treatment of cleft lip. *Progress in Biomedical Optics and Imaging - Proceedings of SPIE* p.7261.
- Mc Elhaney JH, Alem NM, Roberts VL. 1970. A porous block model for cancellous bone. *American Society Of Mechanical Engineers*, 70, p.1-9.
- Muller-Karger CM, Cerrolaza M. 2001. Un nuevo método para la simulación de la estructura ósea mediante la versión p de elementos finitos. *IMME*, 39(3), p.23-54
- Ohnishi I. 2009. Prediction of vertebral strength using a CT based finite element method--clinical application in evaluation of the efficacy of alendronate. *Japanese journal of clinical medicine*, 67(5), p.932-37.
- Patel MR. 1969. *The Deformation and Fracture of Rigid Cellular Plastics under Multiaxial Stress*. Ph. D. dissertation. University of California, Berkeley
- Rice JC, Cowin SC, Bowman JA. 1988. On the dependence of the elasticity and strength of cancellous bone on apparent density. *Journal of Biomechanics*, 21(2), p.155-68.
- Rubin PJ, Rakotomanana RL, Leyvraz PF, et al. 1993. Frictional interface micromotions and anisotropic stress distribution in a femoral total hip component. *Journal of Biomechanics*, 26, p.725-39.
- Taylor WR, Roland E, Ploeg H, et al. 2002. Determination of orthotropic bone elastic constants using FEA and modal analysis. *Journal of Biomechanics*, 35, p.767-73.
- Trabelsi N, Yosibash Z, Milgrom C. 2009. Validation of subject-specific automated p-FE analysis of the proximal femur. *Journal of Biomechanics*, 42(3), p.234-41.
- Ulrich D, Van Rietbergen B, Laib A, et al. 1999. The ability of three-dimensional structural indices to reflect mechanical aspects of trabecular bone. *Bone*, 25(1), p.55-60.
- Weaver JK, Chalmers J. 1966. Cancellous bone: its strength and changes with aging and an evaluation of some methods for measuring its mineral content. *Journal of Bone & Joint Surgery (Am)*, 48(2), p.289-98.
- Wirtz DC, Pandorf T, Porthoine F, et al. 2003. Concept and development of an orthotropic FE model of the proximal femur. *Journal of Biomechanics*, 36(2), p.289-93.
- Zannoni C, Mantovani R, Viceconti M. 1998. Material properties assignment to finite element models of bone structures: a new method. *Medical Engineering & Physics*, 20, p.735-40.

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.

En ESPAÑA

Ley 12/2011, de 27 de mayo, sobre responsabilidad civil por daños nucleares o producidos por materiales radiactivos (BOE 28/05/2011)

El objeto de la Ley es establecer el régimen de responsabilidad civil por daños nucleares, sin perjuicio de lo establecido en el Convenio sobre responsabilidad civil en materia de energía nuclear de 29 de julio de 1960, modificado por los Protocolos de 28 de enero de 1964, de 16 de noviembre de 1982 y de 12 de enero de 2004 (en adelante, Convenio de París) y en el Convenio de 31 de enero de 1963 complementario al anterior, modificado por los Protocolos de 28 de enero de 1964, de 16 de noviembre de 1982 y de 12 de enero de 2004. Las cláusulas contenidas en los citados convenios, serán directamente aplicables a las instalaciones nucleares y a los transportes de sustancias nucleares.

Asimismo, en el título II de esta ley se establece un régimen específico de responsabilidad civil por daños causados por accidentes, que provoquen la emisión de radiaciones ionizantes que pudieran producirse en el manejo, almacenamiento y transporte de materiales radiactivos que no sean sustancias nucleares.

<http://www.boe.es/boe/dias/2011/05/28/pdfs/BOE-A-2011-9279.pdf>

Orden ARM/1783/2011, de 22 de junio, por la que se establece el orden de prioridad y el calendario para la aprobación de las órdenes ministeriales a partir de las cuales será exigible la garantía financiera obligatoria prevista para el régimen de Responsabilidad Ambiental (BOE 29/06/2011)

La presente Orden establece el calendario gradual para la elaboración y aprobación de las órdenes ministeriales que habrá de aprobar el Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino, para establecer la exigibilidad de la garantía financiera y del análisis de riesgo, que habrán de constituir las actividades económicas y profesiones incluidas en el Anexo III de la Ley 26/2007, de 23 de octubre, de Responsabilidad Ambiental.



La priorización de las actividades del Anexo III de cara a la elaboración del calendario, se ha establecido a través de unos criterios basados en la peligrosidad de las actividades económicas, resultando de ello tres niveles de prioridad:

- Nivel de prioridad 1: las órdenes ministeriales se aprobarán entre el 30 de junio de 2013 y 30 de junio de 2014.
- Nivel de prioridad 2: las órdenes ministeriales se aprobarán entre el 30 de junio de 2014 y 30 de junio de 2016.
- Nivel de prioridad 3: las órdenes ministeriales se aprobarán entre el 30 de junio de 2016 y 30 de junio de 2019.

<http://www.boe.es/boe/dias/2011/06/29/pdfs/BOE-A-2011-11176.pdf>

En las Comunidades Autónomas

PRINCIPADO DE ASTURIAS. Decreto 39/2011, de 11 de mayo, por el que se regula la incorporación de organizaciones al sistema europeo de gestión y auditoría medioambiental (BOPA 20/05/2011)

Tal y como determina el Decreto 39/2011, en su artículo 1, el objetivo del mismo es facilitar la aplicación, en el ámbito territorial del Principado de Asturias, del Reglamento (CE) 1221/2009, del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de noviembre de 2009, relativo a la participación voluntaria de organizaciones en un sistema comunitario de gestión y auditoría medioambientales (EMAS), y por el que se derogan el Reglamento (CE) n.º 761/2001 y las Decisiones 2001/681/CE y 2006/193/CE de la Comisión, en particular en lo que se refiere a:

- la designación del organismo competente para efectuar las funciones a que se refiere el Reglamento EMAS
- el establecimiento del procedimiento para la aplicación del Reglamento EMAS en el ámbito

de esta comunidad.

- la creación del Registro EMAS, en el que se inscribirán las organizaciones que se adhieran al Reglamento EMAS.

<https://www.asturias.es/bopa/2011/05/20/2011-10107.pdf>

ANDALUCÍA: Decreto 169/2011, de 31 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento de Fomento de las Energías Renovables, el Ahorro y la Eficiencia Energética. (BOJA 9/06/2011)

El Decreto 169/2011 se dicta en desarrollo y para la ejecución de la Ley 2/2007, de 27 de marzo, de fomento de las energías renovables y del ahorro y eficiencia energética de Andalucía. El Título I, bajo la rúbrica de «Edificios de nueva construcción», establece el régimen jurídico al que se deberán someter los edificios nuevos incluidos en su ámbito de aplicación, así como los edificios existentes que sean objeto de ampliación, cuando ésta suponga un determinado aumento de su consumo de energía.

El Título II establece las obligaciones de uso energías renovables, ahorro y eficiencia energética, que deberán cumplir las nuevas instalaciones industriales y otros centros de gran consumo energético de Andalucía, así como los existentes que sean objeto de ampliación, cuando ésta suponga un determinado aumento de su consumo previo de energía primaria.

El Título III consta de dos Capítulos. En el primero de éstos, se establecen y regulan obligaciones de uso de biocarburantes en los autobuses de transporte público regular de viajeros de Andalucía y en los vehículos de titularidad de la Junta de Andalucía y de sus entidades instrumentales.

En materia de comprobación técnica y certificación, destaca el papel que deben desempeñar los organismos colaboradores, cuya regulación se contiene en el Título IV.

El Título V está dedicado al control e inspección del cumplimiento de las obligaciones establecidas en este Decreto y en el resto de normativa aplicable en materia de energías renovables, ahorro y eficiencia energética, así como a su régimen sancionador.

<http://www.juntadeandalucia.es/boja/boletines/2011/112/d/updf/d2.pdf>

CASTILLA LA MANCHA: Anuncio de 01/06/2011, de la Secretaría General Técnica, por la que se da publicidad al Acuerdo de 10/05/2011 del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el plan energético para el desarrollo de la energía eólica, denominado Plan Eólico de Castilla-La Mancha Horizonte 2014 (DOCM 15/06/2011)

A través del Anuncio de la Secretaría General Técnica se hace público el texto del «Plan Eólico de Castilla-La Mancha, Horizonte 2014», aprobado por el Consejo de Gobierno de

esta comunidad, a petición de la Consejería de Ordenación del Territorio y Vivienda, previa tramitación y decisión de la autoridad ambiental, sobre el procedimiento de evaluación ambiental de planes y programas y del Consejo Asesor de Medio Ambiente.

El citado Plan estará a disposición de los interesados en el siguiente enlace:

<http://www.jccm.es/web/es/CastillaLaMancha/index/plan-1212700430333pl/1212675757419.html>

http://docm.jccm.es/portaldocm/descargarArchivo.do?ruta=2011/06/15/pdf/2011_9069.pdf&tipo=rutaDocm

EXTREMADURA: Decreto 81/2011, de 20 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento de autorizaciones y comunicación ambiental de la Comunidad Autónoma de Extremadura (DOE 26/05/2011)

El presente Reglamento establece las disposiciones para la aplicación, ejecución y desarrollo de la Ley 5/2010, de 23 de junio, de prevención y calidad ambiental de esta comunidad, en lo que respecta a las autorizaciones y comunicación ambiental, a las que se someten las instalaciones y actividades incluidas en su ámbito de aplicación, por su posible afección a la salud de las personas o al medio ambiente.

Asimismo, la citada norma recoge en un único texto, los procedimientos completos recogidos en la normativa autonómica y estatal básica en materia de medio ambiente.

Por ello, su objetivo básico es desarrollar el régimen jurídico en lo que respecta a las autorizaciones ambientales integradas y unificada y a la comunicación ambiental de instalaciones y actividades, con el fin de evitar y, cuando sea posible, reducir y controlar en origen, la contaminación y las emisiones que puedan producir, garantizando la protección del medio ambiente y la salud de las personas.

Además, se establece un régimen de distancias mínimas al suelo urbano o urbanizable para algunas actividades sometidas a autorización ambiental integrada o unificada o a comunicación ambiental, con el fin de prevenir los efectos negativos que puedan tener aquellas, sobre el medio ambiente y la salud de las personas.

<http://doe.juntaex.es/pdfs/doe/2011/10000/11040090.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
- 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
- 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
- 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
- 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=widge-tetd-elegir-es&utm_source=socialmedia&utm_medium=widge&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.

Océ ColorWave® 300

Todo en Uno



Consiga un gran ahorro con el primer sistema multifunción color y B/N Todo en Uno

La nueva Océ ColorWave 300 le ofrece todo lo que necesita para la impresión de documentos técnicos. Gestiona de forma eficiente todos los trabajos de impresión, copiado y escaneado, tanto en color como en B/N. Consiga la sencillez y productividad de un sistema de B/N con la versatilidad y flexibilidad de una en color. Más información en es.marketing2@oce.com o en nuestra página web: www.oce.es



Printing for Professionals