

VIBRACIONES

Ruido estructural

GENERACIÓN DE ENERGÍA

Viabilidad económica de
Instalaciones fotovoltaicas

SOSTENIBILIDAD

La orientación eco-innovadora

TECNOLOGÍA INDUSTRIAL

Arquitectura de control
electrónico en cuadros de
maniobra

GESTIÓN AMBIENTAL

Sistema de indicadores

EMPLAZAMIENTOS INDUSTRIALES

Criterios de Sostenibilidad

SISTEMAS DE TRANSPORTE

Red de distribución inteligente

TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

Durabilidad y ensayos de
envejecimiento

Una reflexión histórica sobre
las herramientas de corte

Tratamientos termoquímicos
para aceros maraging

Sinergia entre el diseño de
la planta industrial y su
mantenimiento



MANTÉNTE INFORMADO

con **DYNA**

Revista Dyna te hace más fácil que nunca mantenerte actualizado en lo último de Ingeniería Multidisciplinar.

Visita hoy mismo www.revistadyna.com y comienza a recibir información actualizada.

- **Noticias** sobre Ingeniería y Tecnología
- **Artículos científicos** auditados por expertos
- **Colaboraciones monográficas** sobre temas de interés
- **Boletín mensual** por correo electrónico
- **Encuestas** para escuchar tus opiniones e ideas
- **Foros** de discusión
- **RSS** para estar informado de lo último publicado
- **Alertas** configurables por correo electrónico.

Publicamos la actualidad en Ingeniería desde hace más de 85 años.

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: enero, marzo, mayo, julio, septiembre, noviembre.

En el número de noviembre 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:

José Antonio Arvide Cambra (Asociación de Andalucía Oriental - Granada), Germán Ayora López (Asociación de Andalucía Occidental - Sevilla), 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), Martín Vega Uribarri (Asociación de Cantabria - Santander).

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), Begoña Martín Pérez (Asociación de Canarias Occidental), Gregorio Martínez Royano (Asociación de Canarias Oriental), Alfredo Arias Berenguer (Asociación de Baleares), Manuel María Uruña Cuadrado (Asociación León).

CONSEJO DE REDACCIÓN

Presidente: Luciano Azpiazu Canivell (Nomántica, Palencia)

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), Andrés Ortuño Carbonell (Asociación de Murcia - Murcia), 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 Girot (Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers - Paris, Francia), Fernando Guijarro Merelles (Universidad de Extremadura - Cáceres), Fernando López Rodríguez (Agencia Extremeña de la Energía - Cáceres), Angel Mena Nieto (Universidad de Huelva - Palos de la Frontera), Ferrán Puerta Sales (Universidad Politécnica de Cataluña - Barcelona), Ignacio Fernández de Aguirre Guantes (Instituto de Fundación Tabira - Durango), Javier Barrondo Apodaca (Asociación Bizkaia - 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), Néstor Goicoechea Larracochea (Universidad de País Vasco - Bilbao), Nicolás Gaminde Alix (Asociación Bizkaia - Bilbao), Joan L. Serarols Font (Universidad de Girona - Girona), Pedro J. Otaduy (ETICG - Oak Ridge, Tennessee, USA), Pere Alavedra Ribot (Universidad Internacional de Catalunya - Barcelona), Raimundo Martínez Giménez (Euroconseil - Sevilla).

CONSEJO ASESOR

Allan Joseph Wailoo (Universidad de Sheffield - Sheffield, UK), 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, México), Ricardo Rodríguez Jorge (Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez - Juárez, México), Erik Ocaranza Sánchez (Instituto Politécnico Nacional - Tlascala, México), Joshué Manuel Pérez Rastelli (INRIA - Paris, Francia).

© 2014. 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 de esta obra o partes de ella sean utilizadas para la realización de resúmenes de prensa. Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra (<http://www.conlicencia.com>; +34 917 021970 / +34 932 720447).

Las opiniones y datos reflejados 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. ,

www.dynapubli.com

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(20140301)89:2<>1.0.TX;2-W

CODEN: DYNAAU

DOI: 10.6036/DYNAII

Tirada de este número: 3.935 (papel) y 48.575 (digital)

Ejemplares vendidos: 3.766 (papel) y 48.575 (digital)

UNIVERSIDADES COLABORADORAS

Universidad del País Vasco, Universidad de la Coruña, Universidad de Vigo, Universidad Carlos III, Universidad de Oviedo, Universidad de Navarra (Tecnum), Universidad Politécnica de Cartagena, Universidad Politécnica de Cataluña, Universidad de Mondragón, Universidad de Gerona, Universidad de Cantabria, Universidad Politécnica de Valencia, Universidad Miguel Hernandez, Universidad Rovira i Virgili, Universidad de Huelva, Universidad Sancti Spiritus.

ORGANIZACIONES COLABORADORAS

CEIT-IK4, Euskalit, Tecnalia, ITEC, ITE, CTM, AIMEN, Gaiker-IK4, IAT, CIATEC

ORGANIZACIONES AMIGAS DE DYNA

Bodegas Muriel, Amic y Structuralia

DIRECCIÓN

José María Hernández Álava

Miembro de:

- Council of Science Editors
- Asociación Española de Comunicación Científica

Suscripción anual Institucional

(Estos precios no incluyen el 4% de IVA)

España	158,10 €
Número suelto	30,60 €
Extranjero	218,10 €
Número para extranjero	38,60 €
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 21% de IVA)

Revista Impresa	Izda.	Dcha.
Página a color	1.036 €	1.183 €
1/2 página a color (Horizontal o vertical)	675 €	800 €
1/4 página a color (Horizontal o vertical)	427 €	492 €
Interior Portada.....	1.224 €	
Interior Contraportada	1.061 €	
Contraportada	1.275 €	
Encartes y Publireportajes	a consultar	

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

Banner web lateral de 200x60 pixels (mín. 7 dd)..... 20 €/día

Banner web superior de 650x80 pixels (mín. 7 dd)..... 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>

JCR (Journal Citation Reports (Thomson-Reuters))

<http://science.thomsonreuters.com/es/productos/jcr>

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 (Thomson-Reuters)

<http://www.thomsonscientific.com>

SCOPUS (Grupo Elsevier)

<http://info.scopus.com>

SUMARIS (Bibliotèques Universitaires 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.

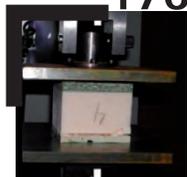
No autorizo el envío por medios electrónicos de información comercial, por parte de PUBLICACIONES DYNA SL.

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

contenido

Marzo - Abril 2014

176



DURABILIDAD Y ENSAYOS DE ENVEJECIMIENTO ACCELERADO EN PRODUCTOS DE CONSTRUCCIÓN

DURABILITY AND ACCELERATED AGING TESTS IN CONSTRUCTION PRODUCTS

183



ANÁLISIS DEL IMPACTO DE UN SISTEMA INTELIGENTE DE TRANSPORTE SOBRE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN

IMPACT OF AN INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEM ON A DISTRIBUTION NETWORK. THROUGH THE APPLICATION OF DISCRETE-EVENT SIMULATION AND ANOVA TEST

192



INTRODUCCIÓN DE CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD EN LA ELECCIÓN DE EMPLAZAMIENTOS INDUSTRIALES MEDIANTE MODELOS MULTICRITERIO

INTRODUCTION OF SUSTAINABILITY CRITERIA IN THE SELECTION OF INDUSTRIAL LOCATIONS THROUGH MULTICRITERIA MODELS

202



SISTEMA DE INDICADORES DE GESTIÓN AMBIENTAL EN UNA ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

ENVIRONMENTAL MANAGEMENT INDICATORS IN AN INDUSTRIAL ENGINEERING SCHOOL

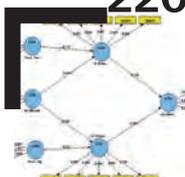
211



ARQUITECTURA DE CONTROL ELECTRÓNICO EN CUADROS DE MANIOBRA DE MÁQUINAS DE CONTROL NUMÉRICO PARA CORTE POR PLASMA Y OXIGÁS

ELECTRONIC CONTROL ARCHITECTURE IN CABINETS FOR PLASMA AND OXIFUEL CNC CUTTING MACHINES

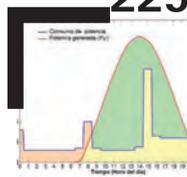
220



DETERMINANTES DE LA ORIENTACIÓN ECO-INNOVADORA EN LA INDUSTRIA CERÁMICA ESPAÑOLA

ENVIRONMENTAL ECO-ORIENTATION DETERMINANTS AT THE SPANISH TILE INDUSTRY

229



VIABILIDAD ECONÓMICA DE INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS DE PEQUEÑA POTENCIA PARA VIVIENDAS MEDIANTE LA MODALIDAD DE BALANCE NETO

ECONOMIC VIABILITY OF SMALL POWER PHOTOVOLTAIC FACILITIES FOR DWELLINGS BY USING THE NET-METERING MODE

236



REDUCCIÓN DEL RUIDO ESTRUCTURAL Y LA VIBRACIÓN EN UN PROTOTIPO DE CABINA DE ASCENSOR MEDIANTE LA UNIÓN ADHESIVA DE PANELES

STUDY OF THE ACOUSTIC ABSORPTION PROPERTIES OF PANELS MADE FROM GROUND TIRE RUBBERS

126

DYNA hace 80 años

128

AULA DYNA: EL INDICADOR DE EFECTIVIDAD GLOBAL DE LOS EQUIPOS COMO MÉTRICA PARA LA MEJORA DE PROCESOS

131

Actualidad

135

Nuevo algoritmo heurístico para solucionar problemas de balanceo en líneas de montaje

136

Condicionantes de la normativa española sobre la biomasa como energía primaria

137

Mantenimiento industrial y conocimiento tácito

138

Centrales nucleares: una visión histórica. 1ª parte

144

Panorama de los sistemas de información para la gestión del mantenimiento

148

"Smart Society", el desafío del siglo XXI

150

Herramientas de corte: una reflexión histórica

154

Desarrollo en España de empresas de servicios para la gestión eficiente de los procesos energéticos

159

La sinergia entre el diseño de planta industrial y mantenimiento-explotación eficiente

165

Análisis comparativo y justificativo para el cambio a leds en instalaciones con lamparas de halogenuro metálico

172

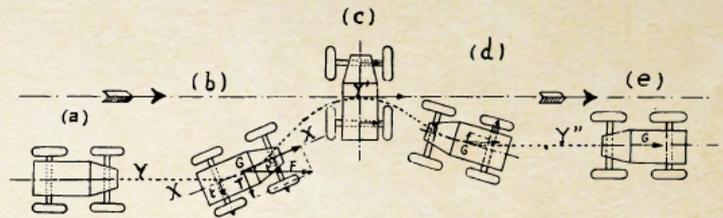
Tratamientos termoquímicos para aceros maraging: nitruración por plasma asistido por arco catódico

DYNA hace 80 años (marzo - abril 1934)

ESTUDIO DEL PATINAMIENTO TRANSVERSAL (DERRAPAJE) EN LOS VEHÍCULOS CON MOTOR MECÁNICO (AUTOMÓVILES)

Comienza el artículo imaginando “un automóvil de cuatro ruedas (de las cuales las dos traseras o posteriores, son motoras) moviéndose sobre una pista de gran anchura, plana, nivelada y de superficie lisa y unida; con un coeficiente de rozamiento igual a 0,4; la velocidad es de más de 50 Kms. por hora; los frenos son de potencia suficiente a anular el movimiento de rotación de las ruedas motoras o traseras; las ruedas delanteras carecen de frenos. Frenamos enérgicamente dichas ruedas hasta anular su rotación; el vehículo es ahora impulsado por la fuerza de su inercia F que supondremos aplicada en su centro de gravedad G ”.

Además de este caso, estudia el autor las trayectorias de derrapaje si se acciona la dirección en sentido contrario a la desviación inicial y si se hace en el mismo sentido, los problemas de una curva y los de adelantamiento. De ese modo obtiene unas conclusiones, como “que los frenos no debieran colocarse en las ruedas traseras y sí en las delanteras”, o que “no debe intentarse ningún adelantamiento a velocidades superiores a 60 Kms. por hora con suelo mojado, o cubierto de lodo”.



Derrapaje de un vehículo de tracción trasera con dirección delantera sin actuar

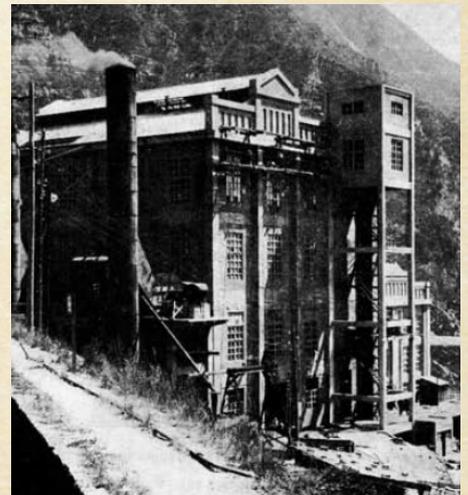
Elías de Ullivarri

LA CENTRAL DE FIGOLS DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA DE CALALUÑA

“La central térmica de Figols, ha sido instalada en las proximidades de las minas de lignito que la Sociedad «Carbones de Berga» explota en el valle del Llobregat a 60 km. al norte de Manresa. La riqueza de la zona minera ha sido estimada en 50 millones de toneladas, lo que constituye una reserva suficiente para más de 100 años”.

Las condiciones del emplazamiento “venían a indicar una potencia de unos 10000 kW. Esta ha sido la cifra que se ha adoptado para la potencia actual de la central. Se ha dispuesto la instalación de modo que pueda ampliarse a 20000 kW si aumenta la producción de las minas; en este caso se instalará una torre refrigerante”.

El tratamiento de los carbones era con molino de bolas Fullar-Bonnot y secado posterior, transportadores y caldera Babcock & Wilcox de Bilbao con quemadores Columet y el turbo-alternador British Thompson Houston, capaz para 12.500 KVA a 6.000/6.500 V. El transformador pasaba la tensión de 6.000 a 25.000 V para su transporte.



Vista de la central desde el canal de Berga

J. M. Aldamizechevarría

UNA NOTICIA DE LA ÉPOCA:

LA NUEVA LÍNEA POSTAL AÉREA SEVILLA - CANARIAS

El mes de enero de 1934 comenzó el servicio postal de la línea aérea Sevilla-Canarias después de 20 viajes de ensayo realizados durante los años 1930 y 31. Dicha línea es servida por aviones trimotores Fokker, equipados con radiotelegrafía de onda corta y onda larga y radiogoniómetro.

Salió el primer avión postal desde Sevilla, a las seis horas cincuenta minutos de la mañana, llegando a Agadir a las diez horas treinta minutos (donde se carga el máximo de gasolina, por ser necesario para la travesía del desierto y en caso de no llegar a Cabo Juby, por causas meteorológicas, tener la suficiente esencia para volver a Agadir o Casablanca). Llegó a Cabo Juby, a las catorce horas quince minutos, volviendo a cargar gasolina para la travesía desde este punto a Gando (Las Palmas), para garantía de tener la suficiente esencia para volver a Cabo Juby. Llegó a Gando a las dieciséis horas quince minutos.

ELECTRICIDAD, TIEMPO DE LOS CONSUMIDORES

El consumidor es el eslabón más débil en la cadena del suministro de la energía eléctrica, y esta afirmación refuerza su validez desde que España facilitó la apertura a la competencia en el sector eléctrico a partir de 1998, ya que todos los usuarios tienen la posibilidad de contratar el suministro en el mercado liberalizado con el proveedor que deseen, pero pocos tienen la capacidad real de hacerlo, bien porque carecen de información o de preparación técnica para abordar un asunto cada vez más complejo.

La complejidad deriva en parte de la extensa normativa legal que regula el funcionamiento de las distintas actividades de producción, transporte, distribución y comercialización de la electricidad, pero también del propio funcionamiento de los mercados eléctricos, caracterizados por una concentración empresarial elevada e insuficiente competencia.

El precio de la energía eléctrica se compone fundamentalmente de dos términos, uno referido a la producción y otro al transporte de la electricidad. El primero, el coste de la producción de la electricidad, resulta de la competencia entre los generadores eléctricos en las subastas diarias del mercado eléctrico mayorista, y alcanza en España valores similares a los de otros países europeos. El segundo término es el peaje por el uso de las redes eléctricas, establecido periódicamente por el gobierno mediante el Boletín Oficial del Estado, que recauda los costes regulados del sistema eléctrico, no sólo la retribución a las empresas eléctricas de transporte y distribución sino también otros costes que han crecido de manera imparable en los últimos años.

El aumento del déficit tarifario como consecuencia del crecimiento exponencial de estos costes regulados del sistema eléctrico, principalmente la partida destinada a la retribución de las primas a las energías renovables, ha terminado por trasladarse a los precios finales de la electricidad que pagan empresas y consumidores domésticos, alcanzando valores insostenibles para muchos hogares y procesos industriales.

Fruto de los problemas de regulación del sector eléctrico español, el precio de la luz aumentó en España un 70% entre 2003 y 2012, situación agravada con la última reforma energética del gobierno en 2013 por el significativo aumento del coste fijo de la potencia contratada. Es un dato objetivo que el promedio de las empresas españolas pagan un precio superior por el suministro eléctrico que la mayoría de sus homónimas europeas, lo que está cuestionando incluso la mejora de la competitividad industrial conseguida en los últimos años mediante ajustes salariales y la contención de los precios de bienes y servicios.

Por otro lado, en los últimos años las fórmulas ofertadas por las empresas comercializadoras a los consumidores para el suministro eléctrico han ido ganando también en complejidad, especialmente por la introducción de los contratos indexados, que no garantizan un precio fijo anual sino un precio variable mensual o incluso horario en función del comportamiento del mercado eléctrico diario de OMIE o de los mercados eléctricos de futuros. Estos nuevos formatos de ofertas son adoptados principalmente por grandes consumidores industriales, pero no cabe duda que las comercializadoras irán extendiendo en el futuro las estrategias de ofertas donde el traspaso del riesgo del mercado a los consumidores continuará creciendo.

Sin embargo, la expectativa de un beneficio potencial basado en la variación diaria de los precios del mercado eléctrico no es tan atractiva para muchas organizaciones, bien porque prefieran consignar una partida presupuestaria anual estable, bien porque no deseen asumir los riesgos derivados de un mercado con mucha volatilidad e incertidumbre.

Ante esta situación, es preciso que tanto las empresas como los usuarios domésticos adopten un papel cada vez más activo en la contratación de la electricidad, informándose y formándose sobre los aspectos técnicos, económicos y legales que les permitan aprovechar las oportunidades del mercado eléctrico liberalizado y reducir el coste de sus facturas mensuales de electricidad.

En este escenario, nuestros colegios y asociaciones de ingenieros industriales pueden aportar un valioso servicio a la sociedad, ofreciendo expertos, publicaciones, conferencias y actividades formativas, participando activamente en los debates del sector eléctrico con opiniones bien informadas y cualificadas, o animando a la gestión ética de los distintos negocios relacionados con la actividad del suministro de electricidad.

EL INDICADOR DE EFECTIVIDAD GLOBAL DE LOS EQUIPOS COMO MÉTRICA PARA LA MEJORA DE PROCESOS

Raquel Caro-Carretero y Susana Ortiz-Marcos de la Universidad Pontificia Comillas

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7061>

1. LA TASA DE EFECTIVIDAD GLOBAL DE LOS EQUIPOS

La información obtenida de la evaluación del desempeño de los procesos de producción y sistemas de transformación permite a directores y gerentes tomar mejores decisiones acerca de cómo manejar sus sistemas de producción más eficaz y eficientemente [1]. Para lograrlo, es necesario establecer las métricas adecuadas a efectos de valoración [2]. Una de las métricas más importantes y de uso del rendimiento de operaciones es la tasa de *Efectividad Global de los Equipos* (*Overall Equipment Effectiveness*, OEE en adelante). Este indicador es una métrica cuantitativa que se viene utilizando cada vez más en la industria no sólo para controlar y supervisar la productividad de los equipos de producción, sino también como un indicador y controlador de mejoras en los procesos y su rendimiento. La medición es una parte importante del trabajo de mejora ya que nos indicará si las medidas adoptadas están dando el resultado que se tenía como objetivo. Además, todo aquello que no se mide, difícilmente se podrá mejorar.

En este contexto, la OEE es capaz de identificar las oportunidades de desarrollo y dirigir los esfuerzos de mejora hacia

las áreas relacionadas con el equipo o utilización del proceso (disponibilidad), tasa operacional (rendimiento) y calidad. Así, la mejora de la efectividad con la que trabajan los equipos y las instalaciones permite el incremento de la efectividad de todo el sistema productivo.

OEE fue propuesto por Nakajima [3] como un enfoque para evaluar los progresos realizados a través de las iniciativas de mejora llevadas a cabo como parte de la filosofía de *Mantenimiento Productivo Total* (*Total Productive Maintenance*, TPM en adelante). El TPM es entendido como un conjunto de múltiples acciones que persigue eliminar las pérdidas por tiempos de parada de las máquinas [4]. Son los mismos operarios de producción que realizan las tareas de TPM de forma autónoma, haciéndose cargo de las técnicas necesarias y proponiendo mejoras en las máquinas que afecten a nuevos diseños de línea. Una vez aquí, resulta de gran importancia definir un sistema de indicadores accesible y fiable para capturar, medir, analizar y evaluar los resultados y desviaciones respecto al objetivo de manera sistemática.

Nakajima [3] define la OEE como métrica o medida de la evaluación de la efectividad del equipo. Así, la OEE intenta identificar pérdidas de producción y otros costes indirectos y “ocultos” que son los que contribuyen a una gran parte del coste total de las mismas. Estas pérdidas se formulan como una función de un número de factores mutuamente excluyentes [5]: disponibilidad, rendimiento (productividad o eficacia) y calidad. En esencia, la OEE es el resultado de multiplicar estos tres factores como se muestra en la Ecuación (1):

$$OEE(\%) = \text{DISPONIBILIDAD} * \text{PRODUCTIVIDAD} * \text{CALIDAD} \quad (1)$$

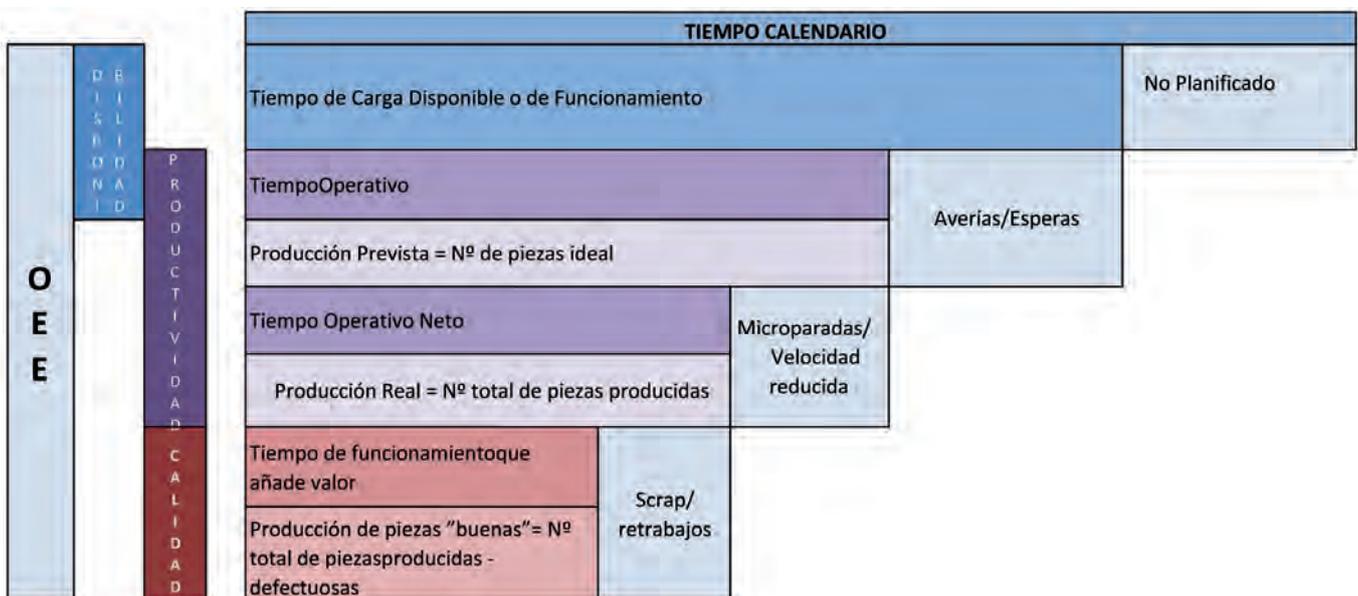


Fig. 1: Esquema de las componentes del indicador OEE

$$\text{DISPONIBILIDAD (\%)} = \frac{\text{Tiempo Operativo}}{\text{Tiempo de carga disponible}} = \frac{\text{Tiempo de carga disponible} - \text{Tiempos muertos (averías/esperas)}}{\text{Tiempo de carga disponible}} \quad (2)$$

$$\text{PRODUCTIVIDAD (\%)} = \frac{\text{Tiempo Operativo Neto}}{\text{Tiempo Operativo}} = \frac{\text{Producción Real}}{\text{Producción Prevista}} = \frac{\text{Tiempo ciclo ideal} \cdot \text{Output}}{\text{Tiempo Operativo}} \quad (3)$$

$$\text{CALIDAD (\%)} = \frac{\text{Tiempo Operativo que añade valor}}{\text{Tiempo Operativo Neto}} = \frac{\text{Piezas "buenas"}}{\text{Producción Real}} \quad (4)$$

$$\text{OEE (\%)} = \frac{\text{PRODUCCIÓN "BUENA"}}{\text{PRODUCCIÓN TEÓRICA EN EL TIEMPO DISPONIBLE}} = \frac{\text{Tiempo Operativo que añade valor}}{\text{Tiempo de carga disponible}} \quad (5)$$

En la Fig. 1 se muestra la relación entre los distintos componentes de la OEE.

De acuerdo a este esquema se pueden calcular las distintas ratios como muestran las Ecuaciones (2-5).

Este indicador no trata de justificar las razones que explican la desviación, sino identificar las pérdidas para poder erradicar las causas que las originan. Cualquier expresión para calcular el OEE debería basarse en la identificación de las mismas y que impiden que el equipo alcance su máximo rendimiento. Así, el OEE no es sólo una métrica, sino que plantea un marco para mejorar el proceso. Es decir, señala qué partes del proceso son susceptibles de mejorar.

2. TIPOS DE PÉRDIDAS EN LA OEE

Las pérdidas son cualquier tipo de actividad que absorban recursos sin crear valor [6]. Si se clasifican las pérdidas por sus causas, se pueden encontrar pérdidas:

1. por **fallos** de las máquinas;
2. de **proceso**: la forma de utilizar el equipo durante el proceso productivo;
3. **externas**: debidas a factores que no pueden mejorarse por el equipo de mantenimiento de la fábrica, como por ejemplo por falta de materias primas, falta de personal o una caída de la demanda.

Estas últimas no son consideradas por el OEE, ya que no son responsabilidad del equipo de mantenimiento o de producción. Sin embargo, las debidas a fallos de máquinas y de proceso, que varían a lo largo del día, son las que causan la disminución en la efectividad de la máquina o equipo. Así, en la operación de una máquina, se pueden distinguir tres tipos de pérdidas (desperdicios o mudas) representados en la Fig.1:

1. **Pérdida de tiempo**: la máquina o equipo debería estar funcionando pero no lo hace.
 - a) **Averías**: cuando un componente de una máquina pierde totalmente sus condiciones iniciales de funcionamiento, causando la parada obligatoria de la misma y la sustitución del elemento por parte de un técnico de mantenimiento. Los ajustes de la máquina hasta conseguir que vuelva a alcanzar su velocidad

nominal, se incluyen dentro del tiempo de avería.

- b) **Esperas**: cuando por algún motivo (cambio de lote o de formato, falta de aprovisionamiento de materiales...) la máquina se queda esperando.

2. **Pérdida de velocidad** (breakdowns): la máquina o equipo funciona, pero por debajo de su velocidad máxima de especificación.

- a) **Microparadas**: la máquina no funciona a velocidad constante y sufre interrupciones cortas e intermitentes. Por ejemplo, bloqueos producidos por sensores de frecuencia o agarrotamientos en las cintas transportadoras.
- b) **Velocidad reducida** (ralentización): diferencia entre la velocidad fijada actualmente y la teórica o de diseño. En ocasiones, la velocidad de producción se reduce para evitar otras pérdidas como pueden ser los defectos de calidad y las averías.

3. **Pérdida de Calidad**: la máquina o equipo produce productos que no cumplen los requisitos de calidad establecidos.

- a) **Scrap** (deshecho): productos que no cumplen los requisitos establecidos por calidad.
- b) **Retrabajo**: operaciones realizadas a los productos que no son buenos a la primera por no cumplir con los requisitos de calidad, pero que pueden ser reprocesados y convertidos en productos buenos.

La OEE sólo considera “buenas” las unidades producidas que salen conformes la primera vez, no las reprocesadas.

3. LOS FACTORES OEE

El primer gran bloque de pérdidas afecta a la ratio de *Disponibilidad* y el objetivo principal es identificar los problemas que generan las averías y paradas para trabajar sobre sus causas y así poder eliminarlas sistemáticamente. Para hacer frente a las mismas es fundamental contar con algún sistema o al menos una planilla de cálculo sencilla que permita obtener esta información con la frecuencia deseada, a partir de la cual se podrán recoger los datos, estratificarlos, elaborar diagramas

causa-efecto y el tan reconocido diagrama de Pareto, así como utilizar otras herramientas más sofisticadas como el histograma o los gráficos de control. En la Ecuación (2) el tiempo de carga disponible se refiere a la tiempo total disponible del equipo después de haber deducido el tiempo dedicado a las actividades planificadas que pueden haber interrumpido la producción, por ejemplo: calendario, horarios y mantenimiento planificado, descansos oficiales de producción, iniciativas de mejora de procesos o un ensayo de equipos, mantenimiento realizado por el operador de la máquina (equipos de limpieza), la formación del operario, etc.

El segundo gran bloque de pérdidas afecta al Rendimiento de operación, el cual mide el nivel de funcionamiento del equipo teniendo en cuenta las pérdidas por tiempos muertos, paradas menores y pérdidas por una velocidad más baja que la de diseño (ver Ecuación (3)). Los tiempos muertos son los periodos en los que no estaba planificado producir por razones legales, festivos, almuerzos, mantenimientos programados, etc., lo que se denominan Paradas Planificadas. Esto puede abordarse de la misma manera que la disponibilidad y con técnicas SMED (Single Minute Exchange of Die- Tiempo de cambio de un solo dígito o inferior a 1 minuto).

Para el tercer bloque de pérdidas, la tasa de *Calidad* mide la fracción de la producción obtenida que cumple los estándares de calidad reflejando aquella parte del tiempo empleada en la fabricación de piezas con defectos (ver Ecuación (4)). Se pueden volver a emplear las técnicas del primer bloque añadiendo algunas herramientas estadísticas como los estudios de capacidad de proceso basados en la dispersión (C_p o C_{pK}). Dentro de este contexto, se puede utilizar la metodología *Six Sigma* como métrica de calidad, persiguiendo eliminar la variabilidad en los procesos para conseguir una calidad más homogénea. El conocido *Rolled Througput Yield* (RTY en adelante) mide el rendimiento total de una fábrica vista como un sistema compuesto por una cadena de procesos de fabricación. Desde este punto de vista, el rendimiento total o RTY, será el producto del rendimiento individual de cada uno de los procesos que forman parte de esta cadena o sistema (*First Time Yield*, FTY en adelante). Por tanto, el rendimiento total del sistema (RTY) se calcularía como se muestra a continuación en la Ecuación (6):

$$RTY = FTY_1 * FTY_2 * FTY_3 * \dots * FTY_N \quad (6)$$

Siendo FTY_i el rendimiento individual de cada uno de los N centros de trabajo, equipos o líneas que forman parte del proceso o sistema y calculado como el número de unidades buenas entre el total de unidades fabricadas en el proceso, o lo que es lo mismo, la tasa de calidad calculada en el OEE.

4. MÁS ALLÁ DE LA MÉTRICA OEE

El propósito de la OEE, definido originalmente por Nakajima [3], es evaluar el progreso realizado por iniciativas TPM a través de una medida de los equipos individuales. Sin embargo, debido a que su uso en la industria es cada vez mayor, investigaciones posteriores han tratado de ampliar el ámbito de aplicación de la OEE a procesos o fábricas enteras. Además, la evaluación de su alcance también se ha ampliado a través

de la inclusión de más elementos del proceso de producción, no sólo la disponibilidad, el rendimiento y la calidad. Por ejemplo, Nachiappan y Anantharam [2] definen la efectividad global de una línea continua de producto. No obstante, casi todos los estudios descriptivos sobre la OEE, basados en su métrica, se utilizan para obtener conocimiento y comprensión del problema de investigación, y no suelen aplicar las consideraciones del análisis estadístico explicativo y/o predictivo. De esta forma, los resultados publicados hasta ahora aportan conclusiones muy generales del comportamiento de la OEE. Teniendo en cuenta esta necesidad, Caro y Ortiz [7] presentan un enfoque cuantitativo buscando la aplicación del análisis estadístico e identificando factores explicativos estadísticamente del indicador.

PARA SABER MÁS

- [1] Garza-Reyes J.A., Eldridge S., Barber K.D. et al. "Overall equipment effectiveness (OEE) and process capability (PC) measures. A relationship analysis". *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2010. Vol. 27 No. 1. p. 48-62. <http://dx.doi.org/10.1108/02656711011009308>
- [2] Nachiappan R.M., Anantharam N. "Evaluation of overall line effectiveness (OLE) in a continuous product line manufacturing system". *Journal of Manufacturing Technology Management*. 2006. Vol. 17 No. 7, p. 987-1008.
- [3] Nakajima, S. *An Introduction to TPM*. 1988. Productivity Press, Portland, OR.
- [4] Ahuja I.P.S., Khamba J.S. "An evaluation of TPM initiatives in Indian industry for enhanced manufacturing performance". *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2008. Vol. 25 Issue 2 p.147-172. <http://dx.doi.org/10.1108/02656710810846925>
- [5] Huang S., Dismukes J., Shi, J. et al. "Manufacturing productivity improvement using effectiveness metrics and simulation analysis", *International Journal of Production Research*. 2003. Vol. 41 No. 3, p. 513-27.
- [6] Mansour H., Ahmad M., Ahmed H. "Potential using of OEE in evaluating the operational performance of workover activities". *Advances in Sustainable and Competitive Manufacturing Systems. 23rd International Conference on Flexible Automation & Intelligent Manufacturing*. Springer. 2013. p. 877-886. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-00557-7_72
- [7] Caro-Carretero R, Ortiz-Marcos S. "Factores determinantes en la tasa de rendimiento en una empresa del sector cosmético" *DYNA Management*. ENERO 2014. Vol. 2-1 p. [No Consta]. <http://dx.doi.org/10.6036/MN6983>

La generación eólica, ¿una tecnología madura?

En el actual período de crisis es habitual escuchar puntos de vista discrepantes sobre la intensificación de diferentes tecnologías de generación eléctrica “renovable”, especialmente por considerarlas de mayor costo sobre las tradicionales de combustible fósil o nuclear. Investigaciones diversas afrontan el reto de mejorar esa competitividad, tanto incrementando la dimensión de los equipos generadores como su eficiencia. En especial el carbón y el incremento de la producción de gas natural, reduciendo su precio, han afectado al crecimiento de ese tipo de generación.

Entre ellas, la realizada por medio de turbinas eólicas es la que mayor potencia mundial dispone con unos 290 GW instalados, de ellos aproximadamente el 40% en Europa y el 20% en EE.UU. Salvo modificaciones sobre los componentes de los equipos, el diseño de estas turbinas se ha decantado ya estructuralmente, siendo a menudo considerada una tecnología madura.

Sin embargo, los esfuerzos citados por aumentar la competitividad han llevado al Laboratorio Nacional Sandia (EE.UU.) a abordar el Proyecto SWiFT (*Scaled Wind Farm Technology*) junto con el fabricante de turbinas Vestas, el *Tech's National Wind Institute* de Texas y el Grupo NIRE. El parque eólico sobre el que se realiza la investigación constará en total de 10 turbinas, de las que se han montado inicialmente tres del modelo V 27 (225 kW) modernizadas con los últimos equipos eléctricos de Baldor y ABB.

Los responsables del proyecto aseguran que en los parques comerciales, entre el 10 y el 40% de la energía eólica no es aprovechada por la incidencia de unas turbinas en otras. Por eso el estudio se dirigirá a:

- Reducir las pérdidas o la disminución de potencia causada por las interacciones entre las turbinas.
- Incrementar la captación de energía desarrollando una nueva generación de rotores.
- Mejorar las validaciones aerodinámicas, aeroelásticas y aeroacústicas utilizando nuevas tecnologías.

La duración del proyecto será de tres años.

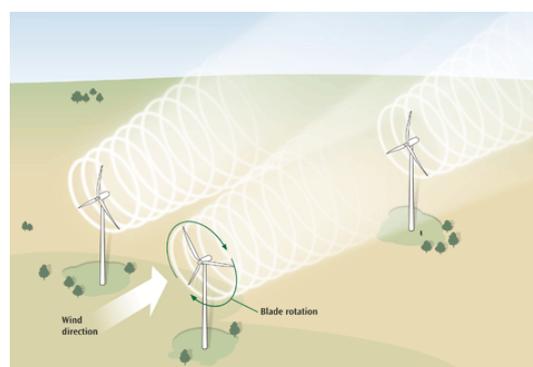
Por otro lado, han causado notable impacto en los medios técnicos norteamericanos las teorías de John O. Dabiri, profesor de Biomecánica de la Universidad de Princeton, sobre las posibilidades de las turbinas eólicas de eje vertical. A pesar de su menor costo y sencillez de construcción y mantenimiento, rara vez han sido tenidas en cuenta por el reducido rendimiento eólico que presentan: la ecuación de Betz indica el 59,3% del total de energía del viento como posibilidad máxima de captación para una turbina de eje horizontal, aunque en realidad rara vez sobrepasa el 40%, y siendo difícil para las de eje vertical conseguir la mitad del mismo.

Sin embargo, estas últimas presentan un atractivo suplementario por ubicar todos los mecanismos de generación y control a nivel del suelo, no necesitar posicionamiento respecto a la dirección del viento ni tener limitaciones máxima o mínima por su velocidad. Las de eje horizontal, a pesar de alcanzar potencias elevadas, precisan además de un considerable distanciamiento que aumenta con la potencia y emiten un ruido apreciable. John O. Dabiri, estudiando el desplazamiento de los bancos de peces, ha mostrado el aprovechamiento que hacen de los vórtices generados en la marcha y propone la instalación de parques compactos de turbinas eólicas de eje vertical, calculando que pueden resultar más competitivos tanto en las posibilidades de energía generada como de la superficie ocupada frente a los habituales de eje horizontal.

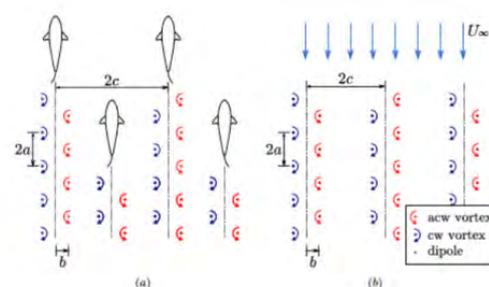
Estos debates se suman a las dos posibilidades de generación que existen para las tur-

binas eólicas: el generador tradicional que recibe el movimiento a través de un elemento multiplicador de las distintas velocidades del rotor a la nominal necesaria y el generador a imanes permanentes que prescinde de ese multiplicador pero que necesita convertidores de corriente posteriores.

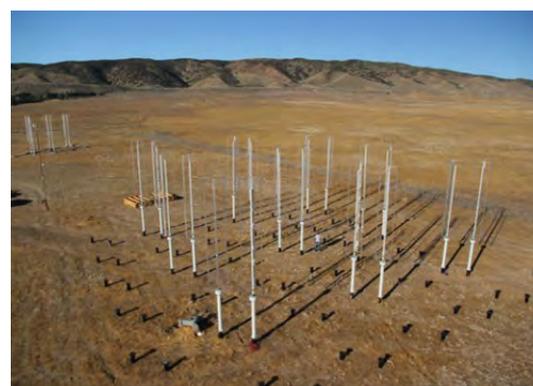
Como podemos apreciar, a pesar de tratarse de una tecnología madura, aún queda mucho trabajo por hacer para optimizar las aplicaciones de la energía eólica.



Diseño del parque para estudiar las interacciones entre turbinas



Los bancos de peces y los parques de turbinas de eje vertical



Parque experimental de turbinas eólicas de eje vertical en Antelope Valley (California)

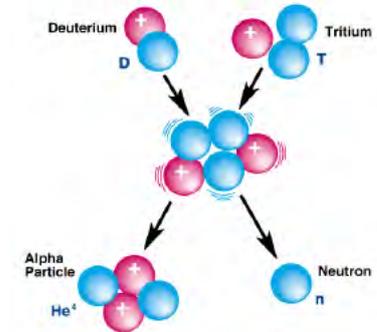
Pensando en el ITER

Ensayos previos en otro reactor

En diferentes ocasiones se han ofrecido desde las páginas de DYNA [1] informaciones sobre el Proyecto ITER, reactor de fusión experimental de gran potencia (500 MW), que marcará en caso de éxito el futuro energético de la humanidad. Ya se tiene amplia experiencia en el mantenimiento confinado del plasma por reducidos espacios de tiempo en varios reactores (*tokamaks*) experimentales existentes aunque de mucha menor potencia, pero sigue siendo un problema crucial la decisión respecto a los materiales más idóneos para recubrir las paredes del toroide de confinamiento, habiéndose ensayado el carburo de boro, grafito, berilio, tungsteno, molibdeno, compo-

sites de fibra de carbono y multicapas combinadas de varios de ellos. La decisión definitiva será clave para culminar con éxito un funcionamiento duradero.

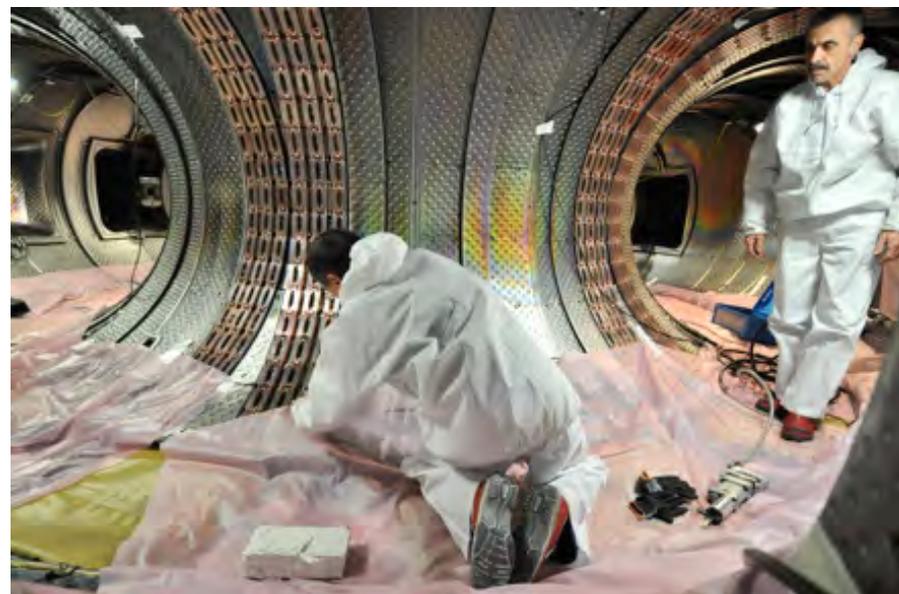
La zona del revestimiento más solicitada, que en el ITER se ha situado en la parte inferior del toro, denominada *divertor*, recogerá todo el material residual del plasma, como el helio, partículas alfa y otras impurezas, bombeándolas para impedir la contaminación del plasma. Además transmitirá calor a un fluido que es el que se utilizará para la generación de energía eléctrica, lo que supondrá unos 20 MW/m². Para esta zona se ha decidido que el revestimiento esté formado por placas de tungsteno.



Reacción de fusión



Visión infográfica de las instalaciones del Proyecto ITER en Cadarache (Francia)



Trabajos de reconfiguración del "tokamak" Tore Supra con placas de tungsteno

Con objeto de contrastar el comportamiento del material elegido, se probará previamente en un tokamak existente, el **Tore Supra** del Comisariado de la Energía Atómica francés, también ubicado en Cadarache y capaz de evacuar hasta 25 MW de potencia térmica. Este reactor inició su funcionamiento en 1998, consiguiendo en 2003 un tiempo record de mantenimiento del plasma de seis minutos y medio extrayendo cerca de los 300 kWh.

En estos trabajos se ha modificado la forma del divertor de Tore Supra para recubrirle con 15.000 placas de tungsteno, operación en marcha con vistas a que pueda efectuar sus primeras pruebas en 2015 y poder comprobar el comportamiento de este material frente al agresivo medio de una reacción de fusión sostenida.

[1] Publicado en DYNA sobre este tema:

- ITER, UN AMBICIOSO PROYECTO DE INVESTIGACIÓN - nº 9 (2003)
- EL PROYECTO ITER - nº 9 (2005)
- EL LITIO LÍQUIDO COMO MATERIAL DE PRIMERA PARED PARA UN FUTURO REACTOR DE FUSIÓN - nº1 (2012)

Educación para el empleo: cómo diseñar un sistema que funcione

Un informe McKinsey

La crisis global ha inducido una importante reducción de la oferta de empleo y los ingenieros no son ajenos a este problema, especialmente entre las promociones más jóvenes. El **McKinsey Center for Government** presentó, el pasado año, un extenso informe, *“Education to Employment: Designing a System that Works”* que puede descargarse íntegro en http://mckinseysociety.com/downloads/reports/Education/Education-to-Employment_FINAL.pdf, de cuyo resumen ejecutivo extraemos algunas ideas, cuya reflexión estimamos puede sernos de utilidad.

Asegura el informe que la existencia de esos altos niveles de desempleo parece deberse a la “falta de habilidades críticas” entre los jóvenes que lo buscan, y por eso trata de averiguar cuáles son los problemas que pueden impedir el pronto acceso desde la educación hasta el trabajo y qué actuaciones lo mejorarían.

Para ello desarrollaron dos investigaciones paralelas: una encuesta de la oferta educativa para jóvenes en nueve países muy dispares cultural, social, geográfica y económicamente (Brasil, Alemania, India, México, Arabia Saudita, Turquía, Reino Unido, Marruecos y Estados Unidos) y un análisis de más de 100 iniciativas de educación para el empleo en 25 países.

Como punto de partida reconocen la existencia de una doble crisis en la empleabilidad, la baja oferta de trabajo debido a la situación económica global y la falta de habilidades en los demandantes de empleo. Pero a esto se une otra carencia grave, el no disponer de datos fiables, especialmente en entender cuáles son las habilidades requeridas por los empleadores y por qué los sistemas educativos no dan la respuesta adecuada.

Las conclusiones finales del informe fueron las siguientes:

1. Los empleadores, los educadores (proveedores) y los jóvenes viven en unos mundos paralelos, es decir que perciben de forma distinta

la misma situación. Los educadores son los más optimistas, pues en mayoría estiman que sus graduados están preparados para el mundo laboral y que el fracaso educativo se debe a que no son capaces de superar las dificultades del estudio.

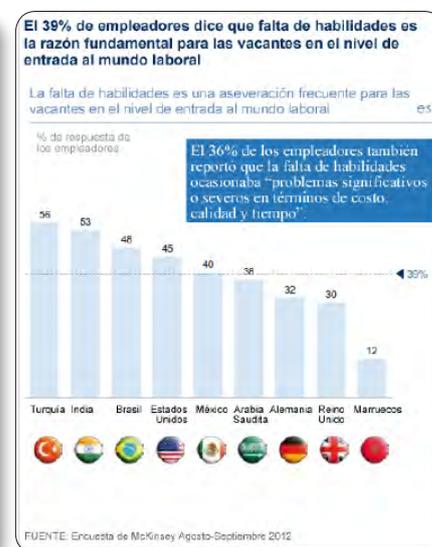
2. La educación para el empleo es difícil y costosa. Los jóvenes piensan que la capacitación para el trabajo durante los estudios y el aprender haciendo sería la mejor forma de abordar el mundo laboral, pero menos de la mitad reconoce que ello se inserta en su currículo.
3. Para empleadores y jóvenes existe un fallo en los sistemas educativos. Solamente alcanzan un éxito apreciable aquellos empleadores que se alían con los proveedores de educación y aportan tiempo, habilidades y fondos económicos para conseguirlo. Suponen solamente algo menos de un tercio de los empleadores.
4. Los programas innovadores y efectivos en educación tienen características comunes. Son los que involucran conjuntamente a las tres partes interesadas, los empleadores que ofrecen a sus propios empleados para que den for-



mación y los que compatibilizan el tiempo educativo con prácticas de trabajo, y eso desde el inicio de los estudios.

5. Un sistema de educación eficiente necesita información estructurada por instituciones motivadas que ofrezcan datos sistemáticos y contrastados sobre lo ocurrido con, al menos, cinco promociones anteriores de cada titulación, tendencias de futuro, posibilidades laborales, etc., y eso por zona geográfica o población objetivo. De ese modo, el estudiante podría hacer su elección con mejor conocimiento de causa.
6. Las posibles soluciones al problema general deben tratarse de manera progresiva, empezando por una formación en los nuevos principios al cuerpo docente, el uso de “serious games” o simulaciones para suplir los casos en que el método de aprender haciendo o las prácticas reales no fueran posible y abordar una mayor alianza con los empleadores para desarrollar soluciones apropiadas.

El informe concluye indicando que no trata de ofrecer una hoja de ruta definitiva sino un punto de partida para el diseño de acciones en cada situación concreta.





115.000 socios ya nos han elegido

Caja de Ingenieros es una sociedad cooperativa de crédito que hace más de 45 años que **satisface las necesidades financieras de sus socios** con soluciones personalizadas y una amplia gama de productos y servicios con las mejores condiciones.

Máxima disponibilidad: nuestras oficinas ofrecen un amplio horario de **lunes a viernes de 8.30 a 19.00 horas.**

Aproveche esta oportunidad y benefíciense usted también

Condiciones especiales para particulares **sin comisiones:**

- En ingreso de cheques nacionales.
- Cuenta corriente de disponibilidad inmediata.⁽¹⁾
- En transferencias nacionales.
- En servicio de gestión de domiciliación de recibos.
- En tarjetas crédito Visa y débito Mastercard.⁽²⁾
- En disposición de efectivo en cajeros Servired.⁽³⁾
- En traspasos de efectivo de otras entidades.



Venga a cualquiera de nuestras oficinas, están a su disposición **desde las 8.30 hasta las 19.00 horas ininterrumpidamente, de lunes a viernes.**

También puede llamar a nuestra **oficina directa**, al 902 200 888 (+34 932 681 331), de **lunes a viernes de 8.00 a 22.00 horas y sábados de 8.00 a 15.00 horas;** será un placer atenderle.

(1) Siempre que el titular haya generado movimientos en los últimos 6 meses.

(2) Siempre que el consumo anual en comercios supere el importe definido para cada tipo de tarjeta.

(3) Exentas de comisiones las cinco primeras operaciones mensuales a débito que realice cada socio en cajeros automáticos de la red ServiRed (independientemente de la tarjeta que utilice para hacerlas).



Nuevo algoritmo heurístico para solucionar problemas de balanceo en líneas de montaje

Jorge Burgos-Meneses,
Joyce Michelle Burgos-Meneses,
Luis Garzón-Aguirre y Jorge López-Pereira
Universidad de Córdoba (Colombia)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/6987>

A pesar de los progresos alcanzados respecto a la resolución exacta de los problemas de balanceo de líneas de ensamble, los procedimientos heurísticos siguen desempeñando un papel muy importante, puesto que permiten obtener soluciones adecuadas en tiempos de procesamiento relativamente cortos, y además son buenas alternativas para los problemas donde métodos exactos no tienen éxito.

Este estudio se fundamenta en la descripción, evaluación y aplicación, a un caso real, de un nuevo algoritmo heurístico tipo *greedy* para la resolución de los problemas de balanceo de líneas de ensamble tipo-1 (SALBPs-1). Este procedimiento heurístico, llamado "algoritmo JOMI", se basa en la búsqueda de la solución a estos problemas estableciendo como regla de prioridad: "escoger la primera actividad de la sucesión de actividades que genera menor tiempo ocioso en la estación"; donde las sucesiones de actividades se refieren a un conjunto de actividades que se preceden entre sí, formando una especie de cadena la cual presenta un tiempo de ejecución menor o igual que el tiempo disponible de la estación de trabajo en cuestión.

En lo relacionado con la evaluación, se encuentra que no existe un método de comparación de heurísticas que cuente con una aceptación general; por lo tanto, se optó por la práctica más común al evaluar esta heurística y otras 14 del mismo tipo en un grupo relativamente numeroso de instancias, utilizando 269 casos encontrados en la literatura, para

ser más exactos en "benchmark data set" para SALBP-1 disponibles para descargar en <http://www.wiwi.uni-jena.de/Entscheidung/alb/>, todas las heurísticas fueron codificadas en el programa MATLAB 2009b para la realización de dicha prueba.

Los resultados obtenidos favorecieron en gran medida a la heurística JOMI, ya que este algoritmo arrojó el mejor promedio de eficiencia de todos con un 90,2409 %, además de obtener en el 55,39% de los casos la solución óptima y una máxima desviación de 3 estaciones del número de estaciones óptimas. Por otro lado, en lo referente al tiempo de procesamiento, en la evaluación comparativa se muestra que el procedimiento propuesto obtuvo el promedio de tiempo de procesamiento más alto, aunque como se puede observar este es relativamente mínimo, incluso menor que el medio segundo (0.4559 segundos) a sabiendas de que no se utilizó el equipo más apropiado para la investigación, en este sentido, y con respecto a las soluciones de las otras heurísticas *greedy* se puede analizar que se presentó un sacrificio de tiempo de procesamiento por eficiencia o calidad de respuesta del algoritmo.

Con el fin de verificar el comportamiento del algoritmo JOMI en casos reales, se tomó como ejemplo una línea de ensamble de fabricación de ciclomotores de la factoría RIEJU S.A ubicada en Figueres la cual presenta 138 tareas. Al balancear dicha línea, se obtuvieron resultados muy buenos que iban desde 88,67% hasta 98,98% de eficiencia, demostrándose así que el algoritmo propuesto puede ser utilizado a cabalidad en cualquier caso real de balanceo de líneas de ensamble.

Finalmente, teniendo en cuenta que se ha diseñado, evaluado y aplicado una nueva heurística *greedy* para los SALBPs-1 la cual obtuvo, en la mayoría de las pruebas realizadas, mejores resultados que los logrados por las heurísticas más comunes de este tipo, se puede decir que la presente investigación ha mostrado otra forma sencilla y factible de resolver los problemas de líneas de ensamble, de cara a futuros proyectos, tanto en casos aplicativos como en adaptaciones a problemas más complejos.

REFERENCIA

BURGOS-MENESES J, GARZON-AGUIRRE L, LOPEZ-PEREIRA J et al. "ALGORITMO HEURÍSTICO TIPO GREEDY PARA LA SOLUCIÓN DE LOS PROBLEMAS DE LÍNEAS DE ENSAMBLE" *DYNA Management*. ENERO 2013. Vol. 1-1 p.[No Consta]. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/MN5714>



Condicionantes de la normativa española sobre la biomasa como energía primaria

José Antonio Ruiz-Bermejo[1], Manuel Celso Juárez-Castelló[2], M^a Pilar Morales-Ortiz[3] y Carlos Berlanga-Labari [1]

[1] Universidad Pública de Navarra
[2] Universidad de La Rioja
[3] Universidad Autónoma de Chile

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/6963>

Ante la pregunta de si debe la legislación asegurar la viabilidad económica del sector de la biomasa, debemos reconocer que la legislación en el contexto de la biomasa es clave para su desarrollo. Los detractores de esto apuestan por las tecnologías convencionales y se apoyan en los precios más económicos, con las que éstas son capaces de generar la energía eléctrica, en oposición al conjunto de energías renovables que necesitan la continua inyección económica de las instituciones.

La respuesta de los que apuestan por las renovables en general, y en la biomasa en particular, se centra en que tal vez no se pague o no esté tasado correctamente lo que cuesta contaminar con las tecnologías convencionales.

El precio parece primar sobre la contaminación, los mercados, sobre la responsabilidad en tema de aprovechamiento de los medios naturales: todo ello en un mundo globalizado donde la competitividad es muy alta y en un momento de crisis tan acusado, contaminar el planeta es algo tolerado, que parece admisible, que no está mal visto y que parece cosa de unos pocos obsesionados con proteger el medio ambiente.

En el artículo citado en referencia se han analizado tanto las Directivas Comunitarias sobre el tema, como su transposición a la Legislación Española y toda la Legislación Española vigente. Así mismo, se ha estudiado con profundidad el *Plan de Energías Renovables* (PER) 2011-2020, partiendo de sus an-

tecedentes PER 2005-2010, estudiando sus objetivos y sus previsiones y analizando las medidas contempladas en el mismo, para el fomento del uso de la Biomasa. Por último se ha analizado el estado actual del uso de la biomasa como Energía Primaria y la Potencia Eléctrica generada con biomasa.

La tendencia energética de los Estados miembros de la Unión Europea es hacia la reducción de consumo de energía primaria, el aumento de la presencia de las energías renovables y la reducción de emisiones de efecto invernadero.

Sin embargo, la legislación española no penaliza económicamente la mayor contaminación de las conversiones energéticas convencionales, al menos en forma que las sitúe en desventaja frente a las no tan contaminantes. Por ello son más rentables aun siendo más contaminantes, y de momento la legislación las avala, de ahí que su uso sea el más extendido.

Durante la vigencia del Plan de Energías Renovables 2005-2010, en lo referente a la cifra de potencia instalada de plantas con biomasa se alcanzó un 48% sobre el objetivo para la biomasa sólida y un 71% para biogás. Se deduce, por lo tanto, que el desarrollo de la biomasa sólida para generación eléctrica fue escaso.

Las instalaciones de generación eléctrica a partir de biomasa parecen no alcanzar las horas de funcionamiento previstas de acuerdo a lo habitual en el diseño de este tipo de plantas (superior o igual a 7.000 horas), siendo la media de horas de operación en torno a las 5.000 horas. Las previsiones para el año 2020 sitúan las horas de operación de la biomasa sólida en generación eléctrica en 6.000 horas/año según el PER 2011-2020, lo cual confirma el déficit tecnológico a resolver de estas tecnologías de conversión energética de la biomasa.

Los planes de potenciación de las energías renovables recogidos en el PER 2011-2020 quedan de momento en segundo plano por la promulgación del Real Decreto-ley 1/2012, por el que se procede a la suspensión de los procedimientos de preasignación de retribución y a la supresión de los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de cogeneración, fuentes de energía renovables y residuos, debido principalmente a la situación de crisis económica en España.

En particular para la biomasa, el PER 2011-2020 preveía un aumento de la potencia térmica renovable de 383 MW en 10 años (38,3 MW/año), cuando el PER 2005-2010 partía en el año 2004 con 451 MW y el objetivo marcado hasta 2010 era de 1.567 MW, lo que supone un aumento de 1.116 MW en 5 años (223,2 MW/año). Este hecho constituye un desistimiento importante en la apuesta por la biomasa para la generación eléctrica previo a la suspensión de los procedimientos de preasignación de renovables.

Parece que quede mucho por hacer en el marco normativo español, para que la biomasa pueda consolidarse como alternativa a otras fuentes de energía predominantes, como los combustibles fósiles. Y para ello, es necesario que los legisladores valoren no sólo los costes económicos, sino también los costes medioambientales y la repercusión a largo plazo de la contaminación en todas sus formas.

REFERENCIA

JUAREZ-CASTELLO M, RUIZ-BERMEJO J, BERLANGA-LABARI C et al. "ANÁLISIS DE LA NORMATIVA ESPAÑOLA SOBRE LA BIOMASA COMO ENERGÍA PRIMARIA: CONSECUENCIAS DE LA MISMA" DYNA Energía y Sostenibilidad. ENERO 2013. Vol. 2-1 p.[No Consta]. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/ES5838>



Mantenimiento industrial y conocimiento tácito

F. Javier Cárcel-Carrasco y
Manuel Rodríguez-Méndez
Universidad Politécnica de Valencia

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/6976>

El mantenimiento industrial, siendo una de las actividades tácticas y estratégicas fundamentales de las empresas, tiene grandes carencias en cuanto a la gestión del conocimiento y con una gran dependencia del conocimiento tácito de todos sus integrantes.

La ingeniería del mantenimiento requiere medios técnicos (herramientas, sistemas de control y experimentación, así como estrategias), y un alto componente de medios humanos muy especializado. Los medios técnicos y estrategias son continuamente estudiados en la literatura científica, sin embargo, el componente humano que inter-actúa, no suele ser estudiado en función de su importante incidencia sobre la eficiencia del servicio. Analizar en que afecta el factor “*conocimiento tácito*” en los procesos tácticos fundamentales del mantenimiento es el objetivo fundamental de esta investigación.

Dicho factor, con un alto componente de subjetividad, se puede considerar como un elemento altamente intrínseco al personal afecto a la actividad, y al ser raramente investigado en el campo de esta operativa industrial, se puede considerar como una “materia oscura”, difícil de observar y en mayor amplitud, con alta dificultad en su medición, y sin embargo, componente fundamental en la eficiencia humana en los procesos de decisión y fallo.

En este estudio se ha procedido al análisis de los componentes que pueden afectar a la gestión del conocimiento en los servicios técnicos de mantenimiento de diversas edificaciones industriales y de servicios, en lo referente a su nivel de información no registrada, mediante técnicas de investigación cualitativas basados en la teoría fundamentada “*Grounded Theory*”, con entrevistas preparadas y analizadas en un entorno real. Para tal efecto, se han realizado en-

trevistas con personal técnico y mandos de organizaciones de mantenimiento de diversas empresas, de sectores diferentes en la Comunidad Valenciana.

Se analizarán los puntos de partida en cuanto a las carencias observadas en relación a la gestión del conocimiento en el entorno de la actividad de mantenimiento. Con ello se quiere dar una perspectiva real (bajo la visión de las personas implicadas) a estudiosos de la gestión del conocimiento, así como a los órganos directores de la empresa, sobre la posible incidencia de mejorar o transmitir el conocimiento de estos operarios que afectan de una manera táctica a la empresa y que le afecta directamente.

Algunos de los problemas más frecuentes y críticos, en relación al conocimiento tácito y la gestión del conocimiento, con los que los especialistas y técnicos de mantenimiento se encuentran son:

- cambios de personal de la plantilla
- poca experiencia de los operarios
- falta de información de medidas a tomar y pasos a seguir ante ciertas averías o incidencias
- dependencia del conocimiento y experiencia tácita de los operarios
- históricos de avería y análisis de causas imperfectos
- desorganización de la información acerca de las instalaciones
- carencia de sistemas de aprendizaje y reciclaje del personal.

Los problemas derivados de los cambios de personal en la plantilla de mantenimiento se traducen en pérdidas económicas debido al desconocimiento por parte del operario de: las instalaciones existentes, fallos típicos y medidas a adoptar ante los mismos, tiempo de rodaje y adaptación a la forma y sistemas de trabajo, etc. La escasa experiencia del operario obliga a otros a abandonar sus tareas para poder enseñarle las ubicaciones, tipos de instalaciones, modo de trabajo, etc., con la consiguiente pérdida de productividad y rendimiento que ello conlleva.

En empresas de mayor tamaño el problema se agudiza y el coste de estos

cambios se incrementa considerablemente, ya que las instalaciones a conocer, los trabajos a efectuar, etc., son mucho mayores. También hay que tener en cuenta para analizar estos costes, la inoperatividad (el aumento en el tiempo medio de resolución de fallos). Por todo ello, hay que tener en cuenta de una manera muy especial la captura del conocimiento tácito del personal técnico que lo opera, y que incide de una manera exponencial en la eficiencia de los servicios que deben prestar dichas infraestructuras.

Mediante esta investigación se pretende hacer una aproximación a identificar el carácter del conocimiento tácito que está presente en todas las organizaciones de mantenimiento y caracterizar los factores sobre los que incide, que afectan directamente a la operatividad y eficiencia de la propia organización técnica de mantenimiento e indudablemente sobre los factores tácticos de la empresa que posee dichas infraestructuras. Con este estudio se tratará de clarificar la incidencia y los obstáculos en la transmisión del conocimiento en esta área fundamental en la empresa, y marcar las condiciones para plantear los métodos con el fin de hacerla más fluida.

El artículo introduce en la problemática existente mediante técnicas cualitativas, a continuación se detalla el marco teórico y la metodología empleada. Posteriormente, se presentan los resultados, la discusión de los mismos y las conclusiones del artículo.

REFERENCIA

CARCEL-CARRASCO F, RODRIGUEZ-MENDEZ M. “EL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL Y EL CONOCIMIENTO TÁCITO: UNA INTRODUCCIÓN SOBRE SU INCIDENCIA” *DYNA Management*. ENERO 2013. Vol. 1-1 p.[No Consta]. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/MN5857>



Centrales nucleares: una visión histórica

1ª parte

Antonio González Jiménez.
Director Técnico del Foro Nuclear

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5757>

1. INTRODUCCIÓN

En el año 1896, el científico y físico francés **Bequerel** descubrió por casualidad la radiactividad natural, al estar trabajando en su laboratorio y dejar descuidadamente unas sales de uranio junto a unas placas fotográficas que aparecieron posteriormente veladas, a pesar de estar protegidas de la luz solar. Después de varios ensayos, comprobó que el uranio era el causante del velado de las placas, por lo que de esta manera, sin saberlo, se convirtió en el “*padre de la energía nuclear*”.

Cuatro décadas después, en 1938, un equipo de investigadores alemanes formado por **Hahn, Strassmann, Meitner** y **Frisch** descubrió la fisión nuclear, a través de la identificación del elemento bario como consecuencia de la escisión del núcleo de uranio. El uranio, al capturar uno de los neutrones con los que se le bombardeaba, se escindía en dos fragmentos, acompañados de una gran cantidad de energía, muy superior a la que se podía producir con cualquier otra reacción nuclear hasta entonces conocida.

Posteriormente, el 2 de diciembre de 1942, un grupo de científicos nucleares, liderado por el físico italiano **Enrico Fermi**, conseguía poner en marcha la primera reacción nuclear en cadena de la historia, en el famoso reactor nuclear *Chicago Pile-1* en la *Universidad de Chicago*. Utilizando combustible de uranio y extrayendo cuidadosamente las barras de control, produjeron una reacción nuclear en cadena, entrando de este modo en funcionamiento el primer reactor nuclear del mundo.

Después de los desarrollos para la fabricación y utilización de una bomba atómica, que puso fin a la Segunda Guerra Mundial, el histórico discurso de “Átomos para la paz” del presidente de Estados Unidos, **Dwight D. Eisenhower**, ante la Asamblea General de las Naciones Unidas el 8 de diciembre de 1953, sentó las bases para un programa de cooperación internacional para el uso pacífico de la energía nuclear, liberándose conocimientos científicos y tecnológicos que permitirían su posterior explotación comercial.

De esta manera, en 1956, en el Reino Unido se inauguró la primera central nuclear comercial en *Calder Hall*, dando origen así a los distintos programas nucleares y a los distintos tipos de reactores que actualmente se encuentran en operación.

Así, a finales del año 2013, en el mundo había 437 reactores nucleares en funcionamiento en 31 países que, con una potencia neta instalada conjunta de más de 374.000 MW, producen alrededor del 14% del total de la demanda de electricidad anual a nivel planetario, unos 2550 TWh.

2. LA FISIÓN NUCLEAR

La fisión nuclear es aquella reacción nuclear en la que núcleos de átomos pesados, al capturar un neutrón incidente, pueden dividirse en dos fragmentos (raramente en tres) formados por núcleos de átomos más ligeros, llamados productos de fisión, con emisión de neutrones, rayos gamma y un gran desprendimiento de energía.

El núcleo “blanco”, al capturar el neutrón, se vuelve inestable, produciéndose su escisión, y dando lugar a una situación de mayor estabilidad con la producción de los fragmentos más ligeros.

En una reacción de fisión se producen varios neutrones, que a su vez inciden sobre otros núcleos fisionables, generando así más neutrones que producirán sucesivos choques con otros núcleos. Este efecto multiplicador se conoce como reacción en cadena.

3. EL REACTOR NUCLEAR

Un reactor nuclear es una instalación capaz de iniciar, mantener y controlar las reacciones de fisión en cadena que tienen lugar en el núcleo del reactor, y que dispone de los sistemas adecuados para extraer la gran cantidad de energía generada en forma de calor. Un reactor nuclear consta de varios componentes, cada uno con un importante papel en la generación de calor:

- El **combustible**, formado por el material fisionable, generalmente óxido de uranio, en el que tienen lugar las reacciones de fisión; es la fuente de generación de calor.
- El **moderador**, que hace disminuir la velocidad de los neutrones rápidos producidos en la fisión nuclear, convirtiéndolos en neutrones lentos o térmicos. Se emplean como materiales moderadores el agua ligera (el agua ligera es



Fig. 1: Dibujo del reactor Chicago Pile-1 y el equipo de Fermi (Fuente: ANS)

H₂O), el grafito y el agua pesada (el agua pesada es D₂O; se conoce como pesada ya que tiene un neutrón más que el agua ligera).

- El **refrigerante**, que extrae el calor generado por el combustible del reactor. Generalmente se usan refrigerantes líquidos, como el agua ligera y el agua pesada, o gaseosos, como el anhídrido carbónico y el helio.
- El **reflector**, que permite reducir el escape de neutrones de la zona del combustible y disponer de más neutrones para la reacción en cadena. Los materiales usados como reflectores son el agua, el grafito y el agua pesada.
- Los **elementos de control**, que actúan como absorbentes de neutrones, permiten controlar en todo momento la población de neutrones y la reactividad del reactor, haciendo que sea crítico durante su funcionamiento, y subcrítico durante las paradas. Los elementos de control tienen forma de barras, aunque el absorbente también puede encontrarse diluido en el refrigerante.
- El **blindaje**, que evita el escape de radiación gamma y de neutrones del reactor. Los materiales usados como blindaje son el hormigón, el agua y el plomo.
- La **vasija del reactor** aloja el combustible, los elementos de control y el moderador, permitiendo el paso indispensable del refrigerante.

Las diversas combinaciones de combustible, moderador y refrigerante configuran los diversos tipos de reactores nucleares existentes. Éstos pueden clasificarse según varios criterios; los más comunes son los siguientes:

- Según la **velocidad de los neutrones** que producen las reacciones de fisión: reactores rápidos y reactores térmicos.
- Según el **combustible utilizado**: reactores de uranio natural, en los que la proporción de U-235 en el combustible es la misma que se encuentra en la naturaleza (aproximadamente 0,7%), y reactores de uranio enriquecido, en los que la proporción de U-235 se ha aumentado hasta alcanzar entre un 3% y un 5%.

- Según el **moderador utilizado**: los que utilizan agua ligera, agua pesada o grafito.
- Según el material usado como **refrigerante**: los materiales más utilizados son el agua (ligera o pesada) o un gas (anhídrido carbónico y helio), que a veces actúan simultáneamente como refrigerante y moderador.

4. DESARROLLO HISTÓRICO

La evolución de los desarrollos tecnológicos de las centrales nucleares ha dado lugar a su clasificación en cuatro generaciones distintas:

- Generación I: constituida por los primeros prototipos iniciales, que fueron construidos a lo largo de las décadas de los años 50 y 60 del pasado siglo.
- Generación II: constituida por las centrales que se construyeron en

las décadas de los años 70, 80 y 90 del pasado siglo, y representan la mayor parte de los reactores en funcionamiento en el mundo.

- Generación III y III+: constituida por las centrales cuyo diseño es el resultado de un desarrollo de las centrales de generación II y reúnen “mejoras evolutivas”, basadas en la experiencia adquirida en las centrales nucleares actuales. Estos adelantos afectan sobre todo a los sistemas de seguridad, a la fiabilidad, a la operabilidad y a la estandarización de los diseños.
- Generación IV: constituida por una serie de proyectos, programas e iniciativas para el desarrollo y prueba de varios sistemas nucleares muy innovadores, utilizables comercialmente hacia la década de los años 40 de este siglo y que ofrecen ventajas muy marcadas con respecto a las centrales nucleares actuales y en los campos

Tipo	Nombre descriptivo del tipo de reactor	Número de reactores
FBR	Reactor reproductor rápido	2
GCR	Reactor refrigerado por gas y moderado con grafito	15
LWGR	Reactor refrigerado por agua ligera y moderado con grafito	15
PHWR	Reactor de agua pesada	48
BWR	Reactor de agua en ebullición	84
PWR	Reactor de agua a presión	273
Total		437

Tabla 1: Tipos de reactores en funcionamiento.

Fuente: Prís/OIEA. Datos a 31 de diciembre de 2013

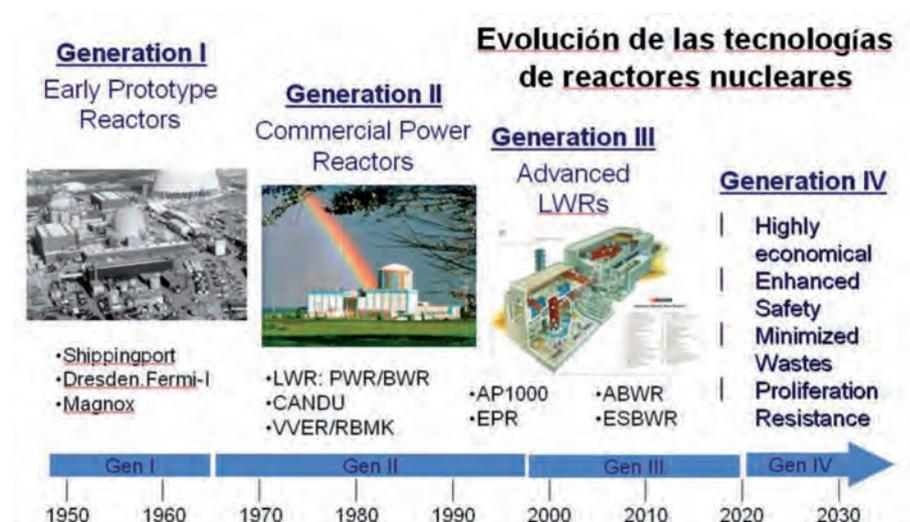


Fig. 2: Evolución de los desarrollos tecnológicos de las centrales nucleares

de la sostenibilidad, la economía, la seguridad, la fiabilidad, la no proliferación y la protección física. Estas centrales se encuentran en su mayoría en fase de diseño y su desarrollo plantea grandes desafíos, sobre todo en aspectos de materiales y combustibles.

En la actualidad, de los más de 430 reactores nucleares en funcionamiento en el mundo, más de un 80% (ver Tabla 1) corresponden a dos tipos de reactores nucleares de la Generación II que utilizan el agua ligera como moderador y como refrigerante. Constituyen el parque nuclear español y son los que se describen con cierto detalle en este artículo:

- Centrales de agua a presión, *pressurized water reactors* (PWR en sus siglas en inglés)
- Centrales de agua en ebullición, *boiling water reactors* (BWR en sus siglas en inglés)

5. EL REACTOR NUCLEAR DE AGUA A PRESIÓN PWR

Las centrales nucleares que utilizan reactores de agua a presión responden a la idea de no permitir la ebullición del refrigerante. En estos reactores, el agua de refrigeración se mantiene a alta presión, por encima de 150 atmósferas, de forma que se impide su ebullición en el núcleo del reactor. El agua del circuito primario actúa como refrigerante del núcleo. Este agua refrigerante entra a

una temperatura de aproximadamente 290°C a la vasija del reactor, fluyendo la mayor parte de la misma hacia la parte inferior entre la pared de la vasija y el barrilete del núcleo, para después atravesar el núcleo de abajo hacia arriba absorbiendo el calor generado por las reacciones de fisión y calentándose hasta aproximadamente 330°C, que es la temperatura a la que sale de la vasija; la presión en el circuito se mantiene mediante el presionador a aproximadamente 160 kg/cm², con objeto de que no se produzca ebullición en el circuito primario.

Este fluido refrigerante a temperatura de saturación abandona la vasija del reactor y se le hace circular por el interior de los tubos, en forma de U invertida, de un intercambiador de calor (generador de vapor), donde cede el calor acumulado al agua que circula por el lado secundario de los generadores de vapor produciendo el vapor que ha de ir a la turbina, donde tiene lugar la transformación de energía mecánica en energía eléctrica.

El vapor, una vez que ha cedido parte de su energía en la turbina, se condensa en otro intercambiador de calor (el condensador) y el condensado vuelve como agua de alimentación al generador de vapor formando un circuito secundario cerrado y totalmente separado del sistema de refrigeración del reactor. Se obtiene así un ciclo indirecto que utiliza vapor no contaminado. La parte de obtención de energía eléctrica a partir de la turbina es convencional.

A la salida de la turbina, el vapor pasa a los condensadores donde cede su calor de evaporación al agua de refrigeración exterior (torres de refrigeración, agua del río, agua del mar, embalses, etc.) constituyendo el sistema de agua de recirculación o circuito terciario. Este sistema de agua de recirculación se mantiene a una presión superior a la del sistema de condensación para evitar la salida al exterior de agua del sistema de condensación en caso de rotura de tubos del condensador.

Este tipo de reactores son de los denominados térmicos, por lo que los neutrones procedentes de la fisión han de ser moderados hasta energías en torno a 1 MeV para que puedan ser capturados por los núcleos de uranio enriquecido, debido a su sección eficaz de captura relativamente pequeña, y producir nuevas reacciones de fisión; en caso contrario (de no moderar los neutrones), las reacciones de fisión en cadena no podrían automantenerse.

5.1. LOS ELEMENTOS DE COMBUSTIBLE

El núcleo contiene el combustible en el que se produce la reacción de fisión. El combustible está formado por pastillas cilíndricas sinterizadas de dióxido de uranio ligeramente enriquecido, entre el 3% y el 5%, introducidas en varillas de aleaciones especiales, como por ejemplo el zircaloy. Estas varillas, denominadas vainas, contienen además un espacio sin combustible inicialmente lleno de helio, destinado a acumular productos de fisión gaseosos. Estas vainas se hallan agrupadas en unidades rígidas y estructuralmente independientes, de diferentes dimensiones según el tipo de combustible de que se trate (por ejemplo, en paquetes de 15x15 ó 17x17 vainas), que se denominan elementos combustibles. El conjunto de elementos combustibles forma el núcleo del reactor y su número depende de la potencia instalada del reactor. Algunas de las posiciones de determinados elementos combustibles están ocupadas por tubos de zircaloy vacíos que sirven de guía a las barras de control, o bien contienen materiales absorbentes de neutrones que se van consumiendo a lo largo del ciclo de operación del reactor. Típicamente, el número de elementos combustibles para una central nuclear de 1000 MWe de potencia instalada es de 157.

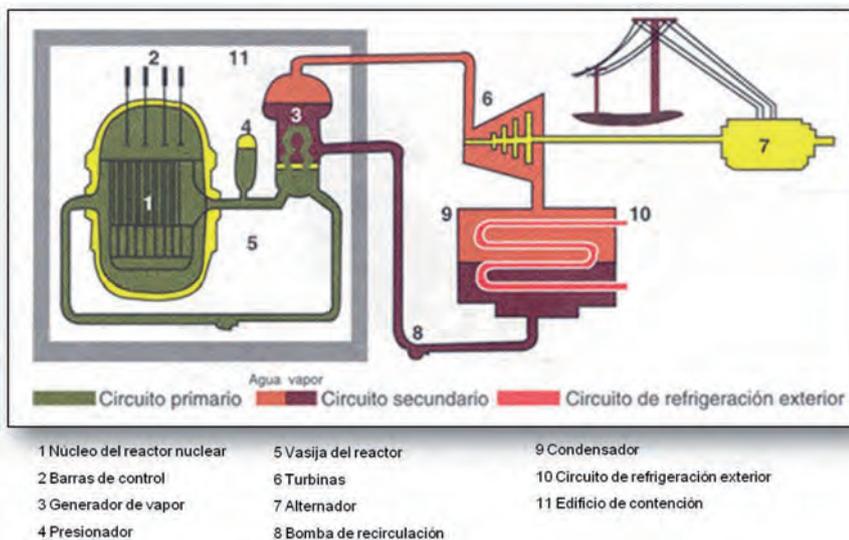


Fig. 3: Esquema general de un reactor PWR

5.2. LAS BARRAS DE CONTROL

Las barras de control constituyen el sistema de control de la reactividad. Cuando se introducen en el núcleo capturan neutrones de la reacción de fisión y causan un descenso de potencia y cuando se extraen del núcleo se produce un aumento de la reactividad. Se construyen con una aleación de plata-indio-cadmio y se envainan en tubos de acero inoxidable que se deslizan por los alojamientos de zircaloy existentes en los elementos combustibles. Todas las varillas absorbentes correspondientes a un único elemento combustible, típicamente 24, forman un conjunto solidario, movido por un único mecanismo, y recibe el nombre de barra de control. Se insertan por la parte superior del núcleo, a través de las penetraciones practicadas en la tapa de la vasija del reactor. Los mecanismos de accionamiento de las barras de control son normalmente de tipo magnético y mueven las barras paso a paso. En caso de pérdida de alimentación a los mecanismos, las barras se desenganchan y caen por gravedad, introduciéndose en el núcleo y parando instantáneamente la reacción en cadena. En las centrales de agua a presión, además de controlarse el reactor por el movimiento de las barras de control, se controla también por medio de un absorbente de neutrones soluble (ácido bórico), cuya concentración se ajusta durante la vida del núcleo para compensar los efectos de consumo de combustible y de la acumulación de productos de fisión.

5.3. EL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DEL REACTOR

El sistema primario o sistema nuclear de suministro de vapor (*Nuclear Steam Supplier System*, NSSS en sus siglas en inglés) consta fundamentalmente de los siguientes elementos:

5.3.1. La vasija del reactor

La vasija es como la carcasa del núcleo y actúa además como barrera de presión y protección del refrigerante del reactor. Aloja en su interior los elementos combustibles que componen el núcleo, las estructuras soporte del mismo, los haces de barras de control, el blindaje térmico y otros componentes internos relacionados directamente con el núcleo. La vasija tiene un cuerpo cilíndrico rematado en ambos extremos

por casquetes semiesféricos, siendo el superior desmontable, al disponer de una brida con pernos que la une con el cuerpo cilíndrico de la misma, permitiendo así la retirada de los elementos combustibles gastados y la colocación de combustible nuevo durante las paradas de recarga de combustible. El sellado hermético entre esta tapa desmontable y el cuerpo de la vasija se consigue con dos juntas toroidales.

A través de la tapa de la vasija entran los mecanismos de accionamiento de las barras de control así como los termopares para medida de temperaturas en el núcleo. Por la zona inferior de la vasija penetra la instrumentación nuclear. Las penetraciones de entrada y salida del agua de refrigeración (toberas) están situadas en la parte cilíndrica. La vasija de un reactor de tres lazos de refrigeración dispone de tres toberas de entrada y de tres toberas de salida del refrigerante. Mide unos 13 metros de altura y unos 4 metros de diámetro.

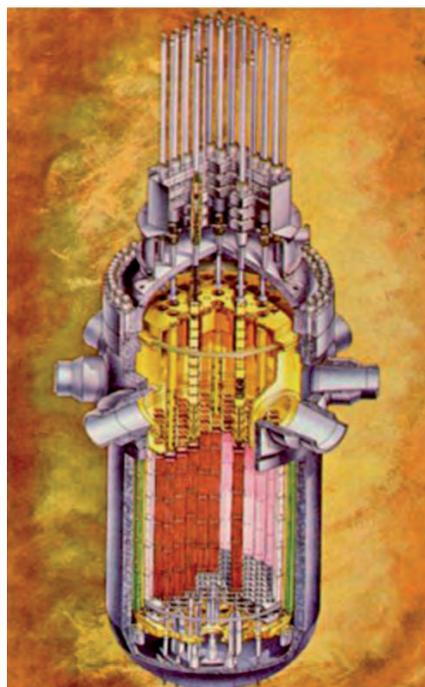


Fig. 4: Vasija de presión de un reactor PWR

La vasija está diseñada según los requisitos de la Sección III del Código ASME y en particular según la Subsección NB que aplica a componentes de clase nuclear 1. Este diseño incluye la consideración de cargas estáticas como el peso del refrigerante y el del combustible y cargas dinámicas debidas al flujo del refrigerante o a posibles

sismos, y cargas térmicas. Es de acero al carbono con un espesor de unos 25 cm y dispone de un recubrimiento interno de acero inoxidable austenítico, depositado por soldadura, al que se denomina *cladding*, para evitar el efecto altamente corrosivo que el agua de refrigeración tendría sobre el acero al carbono. Las penetraciones tanto de las barras de control situadas en la parte superior como las de instrumentación, situadas en la parte inferior, suelen ser de una aleación de base níquel denominada Inconel.

5.3.2. Los lazos de refrigeración

La extracción de calor del núcleo se lleva a cabo con agua que circula por el denominado sistema de refrigeración del reactor, que consiste en varios circuitos similares de refrigeración, o lazos, conectados en paralelo con la vasija del reactor. Estos lazos son idénticos entre sí, salvo por las tuberías que los conectan a otros sistemas, que pueden variar de un lazo a otro. Por ejemplo, el presionador está conectado a uno de los lazos, pero no a los demás, y así sucede con otros sistemas conectados al primario. En general, cada lazo empieza en una tobera de salida de la vasija, va hasta el generador de vapor y vuelve de nuevo a la vasija. Cada lazo dispone de una bomba, denominada bomba principal, que es la encargada de hacer circular el refrigerante, y de un generador de vapor que es el componente en el que se cede el calor al agua que circula por el circuito secundario.

El sistema consta también de un presionador, las tuberías de conexión necesarias, las válvulas de alivio y seguridad del presionador y un tanque de alivio (al que descargan las válvulas anteriores en caso de que tengan que actuar). Las tuberías que constituyen estos lazos de refrigeración son generalmente de acero inoxidable, aunque en algunos diseños se construyen de acero al carbono con un recubrimiento interno de acero inoxidable para evitar la corrosión del acero al carbono.

5.3.3. Los generadores de vapor

El generador de vapor es un intercambiador de calor. Las centrales de agua a presión disponen de generadores de vapor del tipo de tubos en U invertida. En estos generadores, que producen vapor saturado, se pueden distinguir dos

zonas: la zona de intercambio de calor, con el haz tubular, y la zona de separación y secado del vapor. El agua del circuito primario que proviene de la vasija del reactor llega a la caja de aguas y recorre el interior del haz tubular, cediendo su calor al agua del sistema de alimentación que circula por el lado secundario del generador de vapor, convirtiéndola en vapor. Este vapor pasa primero a través de unos separadores de humedad y después a través de unos secadores situados en la parte superior del generador de vapor. Así se obtiene un vapor saturado y seco que se conduce a las turbinas.

El haz de tubos está soldado a una placa, denominada placa tubular, soportado, según asciende el haz tubular, por varias placas horizontales perforadas para el paso de los tubos y dispone asimismo de barras antivibratorias en su parte superior que evitan oscilaciones que deteriorarían los tubos.

El haz tubular consta de cerca de 5.000 tubos, fabricados de una aleación especial (inconel, incoloy, etc.) para evitar su corrosión por el agua del circuito primario. La placa tubular, de más de 50 cm de espesor, constituye, junto con el haz de tubos, la separación entre el primario y el secundario del generador de vapor. Es de acero forjado recubierto de una aleación de inconel. La cabeza semiesférica inferior, situada por debajo de la placa tubular, está dividida en dos mediante una placa de inconel, constituyendo las cámaras de entrada y salida del refrigerante.

Las dimensiones de un generador de vapor son unos 22 m de alto y entre 3 m y 5 m de diámetro en la parte inferior o la superior, respectivamente.

5.3.4. Las bombas principales

La función que cumplen estas bombas es la de establecer una circulación forzada del fluido refrigerante a través de la vasija

del reactor, con el fin de disipar el calor generado en el núcleo y transportarlo a los generadores de vapor. Estas bombas se encuentran ubicadas en la rama fría del circuito primario y recogen el refrigerante ya enfriado procedente de los generadores de vapor y lo introducen de nuevo en la vasija del reactor.

Cada lazo de refrigeración dispone de una bomba, que suele ser centrífuga de tipo vertical de una sola etapa, diseñada para bombear grandes caudales del refrigerante a presiones y temperaturas muy altas. Es conveniente destacar en este componente la importancia de que no existan fugas del fluido o de que éstas estén controladas, por lo que dispone de un sistema de sellado por medio de agua a alta presión que garantiza una fuga controlada y dirigida.

5.3.5. El presionador

El presionador es una vasija cilíndrica de acero al carbono con revestimiento de acero inoxidable austenítico situado verticalmente y con cabezas superior e inferior semisféricas. Es el componente del sistema primario en el que se mantiene en equilibrio la fase líquida y la fase vapor en condiciones de saturación con el fin de controlar la presión. En condiciones normales de operación,

el volumen del presionador está ocupado por un 60% de agua y un 40% de vapor. El agua se encuentra unos 25°C por encima de la temperatura del agua de la vasija. En una central PWR hay un solo presionador.

La parte inferior del presionador está conectada a una de las ramas calientes del primario a través de una tubería que se denomina línea de compensación del presionador. El presionador dispone de calentadores eléctricos de inmersión en la parte inferior cuya función es mantener el agua a la temperatura de saturación correspondiente a la presión de operación y de unos rociadores en su parte superior, cuya entrada de agua proviene de la rama fría, que permiten reducir el exceso de presión en caso de producirse. Conjugando la acción de estos elementos, es decir, vaporizando agua mediante los calentadores o condensando vapor mediante los rociadores, se consigue mantener la presión constante. Si los rociadores no fueran capaces de amortiguar un aumento de presión, el presionador dispone de válvulas de alivio y de seguridad, que permiten la salida de vapor hacia el tanque de alivio del presionador. Las válvulas de alivio, que pueden ser actuadas también manualmente desde la sala de

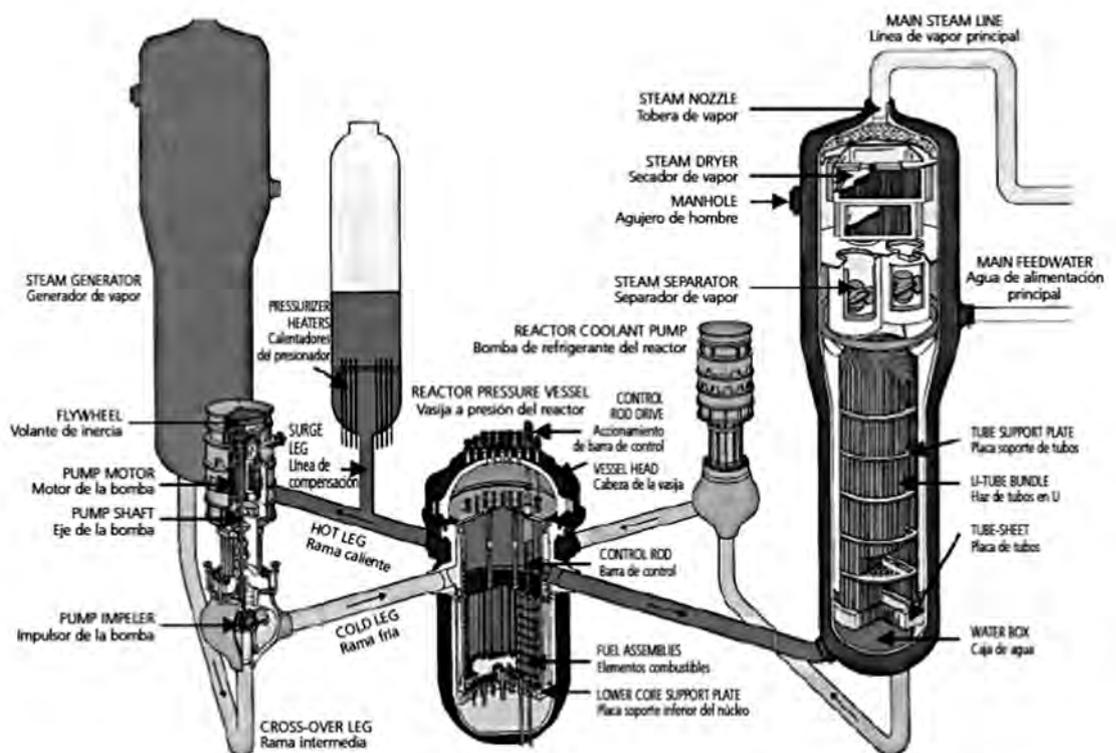


Fig. 5: Circuito primario de un reactor PWR

control, abren automáticamente cuando la presión del presionador aumenta por encima de un valor de consigna programado. Las válvulas de seguridad actúan a una presión superior a las de alivio y una vez que éstas han abierto totalmente. Durante la operación estable parte de los calentadores están conectados, y se mantiene un leve rociado de forma continua.

5.3.6. El sistema de vapor principal

Durante la operación de la central, los generadores de vapor son los encargados de la producción de vapor a partir de la energía térmica generada por el reactor y transportada hasta ellos por el sistema de refrigeración. La mayor parte de este vapor es conducido a la turbina principal, que convierte la energía térmica en energía mecánica de rotación que se convierte en energía eléctrica en el generador principal. La turbina principal consta de un cuerpo de alta presión y dos cuerpos de baja presión. El vapor principal, una vez expansionado en la turbina de alta presión, se envía a los separadores de humedad recalentadores y de éstos a las turbinas de baja presión, recogiendo la descarga en el condensador principal. El condensado es impulsado de nuevo hacia el generador de vapor, una vez recalentado, como agua de alimentación. Esta es la función del sistema de vapor principal en cuanto a la producción de energía eléctrica.

Además, este sistema realiza funciones de seguridad, como pueden ser enviar el vapor producido por el NSSS al condensador, mediante el baipás de turbina, cuando sea necesario para compensar grandes reducciones de carga en la turbina principal y poder controlar el enfriamiento del primario al ir a parada fría; disipar el calor producido en el primario cuando no están disponibles ni la turbina ni el condensador; proporcionar control de la temperatura del agua del primario después de un disparo del reactor; servir como elemento separador entre los sistemas de fluido radiactivo y no radiactivo; y suministrar vapor a ciertos servicios de la central.

En cada línea de vapor principal se encuentran situadas una válvula de alivio, cinco válvulas de seguridad y una de aislamiento. Las válvulas de alivio son capaces de disipar el calor residual del reactor cuando la turbina o el condensador no están en servicio, las de

seguridad protegen a los generadores de vapor contra las sobrepresiones y las de aislamiento consiguen un cierre hermético aislando perfectamente la contención.

5.4. LA CONTENCIÓN

Las centrales nucleares están provistas de un recinto de contención que alberga el sistema de refrigeración del reactor y diversos sistemas auxiliares, suministrando cimentaciones y apoyos para dichos equipos. Sirve de blindaje en operación normal e impide las fugas de productos contaminantes al exterior. El recinto de contención tiene la responsabilidad funcional, junto con los otros sistemas de salvaguardias, de impedir la liberación, en último término, de productos de fisión a la atmósfera en caso de accidente.

El diseño más extendido de contención en reactores PWR es el denominado “contención de presión”. Está diseñada para contener la masa y energía provenientes de un accidente con pérdida de refrigerante con gran rotura de la línea principal de refrigeración. La contención consta de la losa de cimentación y sumidero del reactor, el cilindro vertical, la cúpula, el revestimiento metálico y las estructuras internas. La losa de cimentación y el sumidero del reactor son de hormigón armado, con un espesor de unos 6 metros. El cilindro vertical es de hormigón postensado con un espesor de entre 100 cm y 150 cm, así como la cúpula que tiene forma elipsoidal o semiesférica. El revestimiento metálico, denominado *liner* es de acero al carbono de unos 6 mm de espesor, y asegura la estanqueidad de la contención. Las estructuras internas incluyen, entre otras, la cavidad del reactor y pared de blindaje primario, la pared de blindaje secundario que envuelve los compartimentos de los generadores de vapor y presionador, la cavidad de recarga y la plataforma de operación. En el caso de que se produjese un accidente, la mayor parte del agua proveniente de la rotura o de las válvulas de alivio del presionador o de la descarga de los sistemas de salvaguardias, se recoge en el sumidero de la contención. El vapor liberado a la contención puede condensar en las estructuras internas o por la actuación del sistema de rociado, recogiendo en el sumidero de la contención.

La contención constituye la última

barrera de los productos de fisión frente a las personas y el medio ambiente en caso de accidente.

5.5. OTROS SISTEMAS

Además de los sistemas descritos en los apartados anteriores, una central nuclear consta de otros muchos sistemas necesarios para su funcionamiento. Pueden destacarse sistemas auxiliares como el sistema de control químico y volumétrico, el sistema de aportación de ácido bórico y el sistema de extracción del calor residual. También el sistema de instrumentación nuclear, el sistema de protección del reactor, el sistema de agua de refrigeración de componentes, el sistema de agua de servicios esenciales, el sistema de salvaguardias tecnológicas, el sistema de agua de alimentación, el sistema de agua de alimentación auxiliar y el sistema de tratamiento de residuos radiactivos.

Una central nuclear cuenta además con los sistemas eléctricos necesarios para el funcionamiento de los sistemas que mueven fluidos, tanto en operación normal como en caso de accidente, y con los sistemas de instrumentación y control necesarios para conocer los parámetros de funcionamiento de los sistemas de la central y poder tomar acciones por parte de los operadores en función de los mismos, tanto en la condición de operación normal como en la de parada, y en la hipótesis de situación accidental.

PARA SABER MÁS:

- *Reactores Nucleares*. J.M. Martínez-Val y M. Píera. ETSI Industriales-UPM. Madrid, 1997
- Foro de la Industria Nuclear Española www.foronuclear.org
- Reactor Concepts Manual. Boiling Water Reactor Systems. United States Nuclear Regulatory Commission <http://1.usa.gov/gZODKS>
- Reactor Concepts Manual. Pressurized Water Reactor Systems. United States Nuclear Regulatory Commission <http://bit.ly/Y8YTeV>
- Westinghouse AP-1000 Nuclear Reactor <http://bit.ly/jf1Gza>
- General Electric ABWR Nuclear Reactor <http://bit.ly/154AlYq>
- Areva EPR Nuclear Reactor <http://bit.ly/15ufReV>
- Generation IV International Forum <http://www.gen-4.org/>
- INPRO-OIEA <http://www.iaea.org/INPRO/>

Panorama de los sistemas de información para la gestión del mantenimiento

Mónica A. López-Campos¹ 2 Salvatore-Cannella²
¹ Universidad de Sevilla
² Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (Chile)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5739>

1. INTRODUCCIÓN

Basar la gestión del departamento en los sistemas de información, especialmente para la función de mantenimiento, es una decisión estratégica, que contribuye a la automatización de procedimientos y toma de decisiones, (al hacerlos independientes de la dispersión geográfica, de las tecnologías y de las personas).

Esta automatización genera beneficios para la gestión del mantenimiento, como el contar con información en tiempo real y datos históricos, mayor visibilidad de las operaciones, mejor control de la criticidad y prioridad, eliminación de tareas redundantes, gestión del conocimiento, reducción de tiempos y costes, etc.

A pesar de las mencionadas ventajas, las estadísticas señalan que el sector empresarial no aprovecha completamente las ventajas que brinda la incorporación de estos sistemas. Según la experiencia de los autores, esto puede deberse a un vacío de información sobre las características y particularidades de los sistemas de información para la gestión del mantenimiento.

Esta ha sido la motivación para desarrollar el presente texto, el cual tiene el propósito de introducir al lector hacia los sistemas de información para la gestión del mantenimiento más extendidos actualmente: los sistemas de *gestión del mantenimiento asistida por ordenador* (GMAO) y los sistemas de *gestión de activos empresariales* (EAM). Así como ofrecer algunas observaciones y recomendaciones que pueden ser de interés en el proceso de implementación de estos sistemas.

2. DESARROLLO DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN PARA EL MANTENIMIENTO

El desarrollo de los Sistemas de Información para el Mantenimiento (SIM) puede dividirse en tres fases:

La **fase de Introducción** corresponde a la aparición de los primeros ordenadores, desde la década de los '50 y '60 cuando solamente las mayores empresas podían permitirse tener un ordenador, hasta entrados los años 70 cuando aparecieron los primeros ordenadores personales. La información en ese entonces no podía ser compartida entre distintas funciones de la organización. Mucho de la gestión del mantenimiento era hecho de forma manual.

Los primeros sistemas informáticos específicos para el mantenimiento surgieron en los años 70 y se limitaban a realizar algunas tareas de calendarización de acciones preventivas. Al inicio de los '80 fueron desarrollados programas dedicados para funciones específicas, permitiendo ya la sistematización, planificación y control de las tareas de mantenimiento. Ya para 1985 había 60 sistemas de gestión del mantenimiento asistido por ordenador (GMAO) disponibles en el mercado, con funcionalidades como programación de actividades de mantenimiento, control de almacenes, control de presupuestos y archivo histórico. Sin embargo en estos tiempos los sistemas GMAO aún tenían pobre integración y pobres interfaces.

La **fase de Coordinación** se dio desde finales de los años 70 y durante los '80: es, entonces, cuando se comenzó a permitir intercambiar información entre distintas tecnologías y áreas de una misma organización, ya que por ese entonces diferentes autores concluyeron que una condición para tener un sistema GMAO efectivo es su conexión con las estrategias de la organización en su conjunto.

Se comenzó así a explorar el uso de los sistemas GMAO de manera integra-

da con otras funciones organizacionales como control de calidad, compras, finanzas y producción. A partir de ese momento, las interfaces de manejo para el usuario comenzaron a ser diseñadas de modo más amigable.

Durante el inicio de los años 90 el enfoque se dirigió hacia la mejora de la gestión del mantenimiento preventivo (por ejemplo, en forma de sistemas expertos para la planificación de políticas de mantenimiento, calendarización, diagnóstico de fallos, etc.). También durante esta etapa comenzó a gestarse la idea del mantenimiento predictivo en forma de sistemas informáticos para la monitorización y el mantenimiento centrado en condición.

La **fase de Integración** se inauguró al final de los años 90, cuando surgieron los sistemas que integraban las distintas bases de datos y funcionalidades de la organización en una interfaz común, que además daba énfasis a los aspectos económicos relacionados con el mantenimiento. Surgieron los sistemas integrados para la *planificación de recursos de la empresa* (ERP), la *manufactura integrada por computadora* (CIM) y los *sistemas de registro de datos y control de supervisión* (SCADA). La evolución de las *tecnologías de la información y la comunicación* (TIC) hizo presente propuestas para el desarrollo de la monitorización remota y del tele-mantenimiento.

Es hasta el inicio de los años 2000 cuando los desarrollos tecnológicos para el mantenimiento dejan de enfocarse exclusivamente en los sistemas GMAO y crece la implementación de otros tipos de tecnologías basadas en el uso de dispositivos móviles y redes de comunicación, principalmente para la monitorización en tiempo real, la toma de decisiones, el diagnóstico de fallos y la realización de procesos a distancia, naciendo así el concepto de "*e-maintenance*".

Finalmente como tendencias futuras, se plantea el surgimiento de técnicas como la combinación de herramientas de diseño con herramientas de mantenimiento y los sistemas de auto-mantenimiento. Estos sistemas de auto-mantenimiento serían capaces de monitorizarse, diagnosticarse y repararse a sí mismos.

3. LOS SISTEMAS GMAO

Un sistema de GMAO se define como un conjunto integrado de *software* y archivos de datos diseñados para proveer un medio efectivo de gestionar una cantidad masiva de datos de mantenimiento en una forma estandarizada. En otras palabras, es un paquete de software que contiene una base de datos con información sobre la gestión del mantenimiento, información que sirve para realizar las tareas de mantenimiento más eficientemente y que ayuda a la toma de decisiones.

Diversos autores han coincidido en la importancia de contar con un sistema GMAO para la adecuada realización de la gestión del mantenimiento; incluso es nombrado como una plataforma para alcanzar el mantenimiento de “clase mundial”. Estos sistemas permiten acceder a los datos y transformarlos en información que puede ser usada para priorizar las acciones y tomar mejores decisiones en las actividades de mantenimiento, tener un control adecuado de los procesos y su importancia aumenta cuando el número de ítems a mantener y la complejidad de una planta son más altos.

Aunque la incorporación de un sistema de GMAO puede llegar a reducir entre un 10-30% el presupuesto anual del departamento de mantenimiento, en la mayoría de las empresas estos sistemas han sido usados más como una simple base de datos que como un soporte para la toma de decisiones. Muchas de las funciones que puede cumplir un sistema GMAO en ocasiones no son aprovechadas por desconocimiento.

Un condensado de las funciones de un GMAO puede clasificarse como a continuación se muestra:

Funciones de planificación y ejecución del mantenimiento:

- Gestión de mantenimiento preventivo, correctivo, predictivo
- Control de procedimientos de mantenimiento
- Gestión de los reportes de mantenimiento, órdenes de trabajo e intervenciones (planificación, programación, generación de alertas, etc.)
- Gestión de datos históricos
- Monitorización basada en la condición
- Gestión y control de documentos, dibujos y registros

- Base de conocimientos para ayuda al nivel operativo
- Integración con otros sistemas de información empresariales

Funciones de gestión de recursos:

- Gestión de personal
- Gestión de activos e instalaciones
- Gestión de inventarios y compra de materiales y repuestos
- Manejo de presupuestos y costos
- Comunicación con las demás áreas de la empresa
- Captura y tratamiento de la información

Funciones de evaluación y mejora:

- Análisis de capacidades e indicadores claves del proceso
- Análisis de datos históricos
- Gestión de inspección y auditorías
- Generación de reportes
- Gestión para el autocontrol y la mejora continua

Además, los sistemas GMAO pueden ser usados no solo para gestionar, sino para automatizar el *Mantenimiento preventivo* (PM), el control de los inventarios y la compra de materiales. Así como para llevar a cabo el *Mantenimiento Basado en la Condición* (CBM).

4. LOS SISTEMAS DE GESTIÓN DE ACTIVOS EMPRESARIALES

También conocidos como sistemas EAM por sus siglas en inglés “*Enterprise Asset Management*” son sistemas que básicamente realizan las mismas o similares funciones que los GMAO, pero que, además, se integran con otras funciones como finanzas, recursos humanos, gestión de materiales y otras aplicaciones para la planificación de recursos empresariales (sistemas ERP).

Típicamente un sistema GMAO se maneja estrictamente dentro de los confines de la orden de trabajo, el mantenimiento preventivo y sus inventarios. Los sistemas EAM abarcan todas esas funciones y además ofrecen más posibilidades, ya que típicamente los GMAO no incorporan módulos de finanzas y contabilidad (diferentes al simple archivo histórico de costos), ni de recursos humanos (diferentes al reconocimiento de los requerimientos de personal). Algunos paquetes EAM cuentan con la funcionalidad de conectarse a las aplicaciones, sistemas y subsistemas de planificación y control de la producción, pudiendo generar órdenes de mantenimiento en los tiempos disponibles, optimizando el rendimiento de las líneas de producción.

El *software* de EAM ofrece una robusta metodología para la documentación de los equipos y sus partes, incluyendo garantías, esquemas y diseño asistido por ordenador (CAD). Donde cada dato que es almacenado en el sistema está disponible para su utilización en otros módulos. La información puede ser reciclada, permanece consistente, actualizada y nunca tiene que ser ingre-

El *software* de EAM ofrece una robusta metodología para la documentación de los equipos y sus partes, incluyendo garantías, esquemas y diseño asistido por ordenador (CAD). Donde cada dato que es almacenado en el sistema está disponible para su utilización en otros módulos. La información puede ser reciclada, permanece consistente, actualizada y nunca tiene que ser ingre-

Funciones y características	Típicamente encontrado en:	
	GMAO	EAM
Base de datos estructurada y jerarquizada	Si	Si
Disponibilidad de suministros	Si	Si
Disponibilidad de recursos humanos	Si	Si
Requisición de compras	Si	Si
Calendarización del mantenimiento preventivo	Si	Si
Rastreo de costos	Si	Si
Mantenimiento del total del ciclo de vida del activo	No	Si
Análisis de mantenimiento predictivo	No	Si
Análisis de alternativas de mantenimiento	No	Si
Gestión de riesgos del activo físico	No	Si
RCM	No	Si
Análisis de causa raíz	No	Si
Análisis financieros de costo/vida	No	Si
Gestión de cambios en documentos técnicos	No	Si
Planificación estratégica para la gestión de activos	No	Si

Tabla 1: Características de un GMAO y de un EAM (adaptado de Strub y Jakovljevic, 2010)

sada más de una vez en el sistema. La Tabla 1 compara algunas de las características esperadas en un GMAO y en un EAM.

Se puede decir que el *Mantenimiento Centrado en Fiabilidad* (RCM) es el diferenciador crítico entre un sistema GMAO y un EAM. RCM es un proceso para definir una planificación efectiva para cada activo a mantener con un desempeño fiable. En vez de concentrarse en prevenir que el activo falle, el RCM se enfoca en el paradigma desde el cual la predicción es la mejor acción a ser tomada. Por lo tanto el crear un ambiente propio para el RCM es un proceso de análisis y mejora continua.

5. CONSIDERACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN PARA EL MANTENIMIENTO

La inversión en un *Sistema de Información para el Mantenimiento* (SIM), ya sea un GMAO o un EAM es a largo plazo y el retorno de la inversión depende entre otros factores, de lo adecuado de la selección del *software*, de la efectividad de su implementación y del compromiso del personal con el nuevo sistema. Si se dan efectivamente estas condiciones, se producen muchos beneficios: disponibilidad de planta y equipos aumentada; menores costos, principalmente debido a una mejor dirección y a la reducción de acciones correctivas; vida de activos alargada; control mejorado de la planificación del mantenimiento preventivo; reducción del mantenimiento correctivo debido al mejor manejo de datos de mantenimiento y estadísticos, entre otros.

Sin embargo a pesar de los beneficios reportados un alto porcentaje de los SIM no son operativos, no rinden los beneficios esperados o son eliminados después de un breve tiempo de uso. Un estudio realizado por *The Standish Group in Massachusetts, USA* reveló que el 74% de los proyectos para implementar un sistema GMAO fracasan y otros reportan que el 57% de la totalidad de las empresas no alcanzan el retorno esperado de la inversión que hicieron en el SIM.

Todo lo anterior puede deberse a que existe una gran variedad de condiciones necesarias para que un SIM pue-

da ser implementado adecuadamente y que la mayoría de las empresas desconocen. Estas condiciones pueden obedecer a factores relativos a la empresa o al diseño y características de operación del sistema en cuestión. Por ejemplo: la poca operabilidad de un SIM puede deberse a la no existencia de proyectos de iniciación y control de este tipo de *software* dentro de la empresa, ya que instaurar un SIM constituye una decisión estratégica debido a sus implicaciones hacia otras áreas, los grandes tiempos y costos requeridos. Además, el sistema elegido puede no coincidir con la estrategia de mantenimiento o de operaciones o puede no ser compatible con los restantes subsistemas de información de la compañía. De hecho, una de las principales dificultades para implementar exitosamente un SIM es la necesidad de personalizar el *software* de acuerdo a las necesidades de la empresa. Necesidad que llega a presentarse en el 64% de los casos.

Las tareas para configurar un SIM pueden tomar meses para completarse. La mayoría de los sistemas no comienzan a ser operacionales hasta después de un año de su instalación y no operan con todas sus funcionalidades al 100% sino hasta pasados varios años. La instalación de un SIM puede tomar tan solo una semana, sin embargo en ese punto no se cuenta con información de utilidad dentro del sistema. Esto es lo que hace complicada su implementación. Además la mayoría de los paquetes utilizan tecnologías de base de datos tipo cliente-servidor (*Oracle, SQL Server, SQLBase*) para distribuir la información en las estaciones de trabajo. Estos sistemas generalmente no son tampoco sencillos de configurar, especialmente en infraestructuras que poseen ya restricciones de tipo TIC. Es por este motivo que algunos investigadores sugieren como mejor solución ante el alto costo que implica enmendar un sistema comercial, el desarrollo interno de un nuevo sistema a partir de sistemas genéricos y que refleje la especificidad del ambiente de aplicación.

Los siguientes factores técnicos pueden influenciar en gran medida en el éxito de un SIM:

- La calidad del sistema, que puede ser evaluada como la usabilidad (interfaz amigable al usuario), dis-

ponibilidad, confiabilidad, adaptabilidad y tiempo de respuesta.

- La calidad de la información, que puede ser evaluada en función de su amplitud, facilidad de comprensión, coherencia, importancia y fiabilidad.
- La calidad del servicio del departamento de TIC (o proveedor externo) y de su personal (disponibilidad, tiempo de respuesta, empatía, etc.).

Es de notar que algunos SIM no proveen la información necesaria suficiente para hacerlos operativos, ciertos módulos no son utilizados debido a la falta de capacitación del personal o por mala actitud al cambio por parte de los recursos humanos. También es posible que no se realice adecuadamente la implementación porque la gerencia espera resultados a corto plazo.

Un SIM debe incorporarse siempre de la mano con una adecuada planificación, ya que hay estudios que declaran que una mala implementación puede resultar en costos aumentados de mantenimiento; solamente cuando el sistema es acompañado de cambios en los hábitos de mantenimiento y metas, resulta un adecuado incremento en productividad y en la mejora de prácticas.

Con lo visto anteriormente, para la elección de un SIM hay que considerar factores técnicos como el tamaño del sistema a elegir (pudiendo ser éste un sistema simple, pequeño o grande dependiendo principalmente de su costo), número de módulos, nivel de integración con software ERP y desempeño. Igualmente se recomienda analizar factores económicos y de gestión como los requerimientos materiales y de cualificación del personal, el ratio de retorno sobre la inversión esperados, los costes de mantenimiento, puesta a punto, entre otros.

6. CONCLUSIONES

Utilizar los Sistemas de Información para la Gestión del Mantenimiento (SIM) ofrece muchas ventajas, derivadas principalmente de la evolución constante que han tenido las TIC con el paso de los años. Actualmente, se puede contar con sistemas especializados en diversas tareas relacionadas con

la gestión del mantenimiento, integrados con el resto de sistemas de información de la organización y que incluso incorporan desarrollos que facilitan el mantenimiento proactivo, aspectos predictivos y la monitorización remota de la condición de los equipos.

Hoy por hoy, los SIM más extendidos en el mundo empresarial son los sistemas de Gestión del Mantenimiento Asistida por Ordenador (GMAO) y los sistemas de Gestión de Activos Empresariales (EAM). Estos últimos tienen un alcance más extenso, ya que además de realizar las mismas funciones que los sistemas GMAO integran otras aplicaciones tipo ERP. Muchos de ellos, además, se especializan en análisis RCM.

Sin embargo es necesario reconocer que, a pesar de sus funcionalidades, una gran mayoría de SIM no es completamente aprovechada por las empresas que los adquieren, funcionando únicamente como costosos y complejos repositorios de información. Para evitar esta desfavorable situación es necesario realizar un análisis previo a la adquisición de un SIM, donde es necesario considerar tanto aspectos técnicos (diseño del sistema, compatibilidad con el resto de sistemas de información de la empresa, necesidad de personalización, disponibilidad de datos para la operación, tamaño del sistema) como aspectos económicos y de gestión (costos implicados, capacitación y actitud del personal, tasa de retorno sobre la inversión, entre otros). Y aunque podría esperarse que los potenciales problemas derivados del intercambio de información entre interfaces distintas pudiera resolverse adquiriendo un sistema ERP que incluyera aplicaciones de gestión de mantenimiento, la mayoría de estos sistemas incorporan módulos que no cubren completamente las necesidades de los usuarios de mantenimiento, por lo que otra posibilidad que también debiera considerarse es la hechura "a medida" de un SIM en lugar de comprar un paquete comercial. Sin embargo no hay que olvidar que la efectiva elección de un SIM dependerá de las características particulares de cada organización.

PARA SABER MÁS

- Crain M. "The Role of CMMS" [en línea]. Industrial Technologies Northern Digital, Inc. [USA]: Northern Digital Inc 2003 [ref. Junio 2010]. Disponible en World Wide Web: <http://www.plant-maintenance.com/articles/Role_of_CMMS.pdf>.
- Strub J, Jakovljevic PJ. "EAM versus CMMS Part 1" [en línea]. CMMSCity [USA]: CMMSCity 2010 [ref. Febrero del 2010]. Disponible en World Wide Web: <http://www.cmmscity.com/articles/eam_cmms_1.htm>.

THINK BIG THINK BIEMH

28 BIEMH

BIENAL ESPAÑOLA
DE MÁQUINA-HERRAMIENTA

2-7 JUNIO
2014

Una gran feria con grandes
soluciones para hacer
grandes negocios, donde
el expositor es el protagonista.

BIEMH
PRESENTATION
& NETWORKING
PREVIEW

Encuentros comerciales
internacionales previos al certamen

Colaboran



Organizan



EXPOSSIBLE!

"Smart Society", el desafío del siglo XXI

Aníbal R. Figueiras Vidal
Académico Numerario, Real Academia de Ingeniería
Catedrático de Universidad, U. Carlos III de Madrid

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5849>

El explosivo despliegue de redes de telecomunicación digitalizadas y la disponibilidad de cada vez mayor potencia de cómputo ha posibilitado el desarrollo e implantación de conjuntos de aplicaciones y servicios en ámbitos con relevante impacto social: "smart cities", "e-health" y "smart energy" sirven como destacables ejemplos. La metodología adoptada para ello ha sido muy directa: se selecciona un proceso susceptible de mejora o un problema a resolver, se diseña una solución tecnológica y se instala.

Pausada, parsimoniosamente, tal y como ha venido ocurriendo con la adopción de las herramientas de ayuda a la decisión en ambientes donde su necesidad y beneficio se hicieron evi-

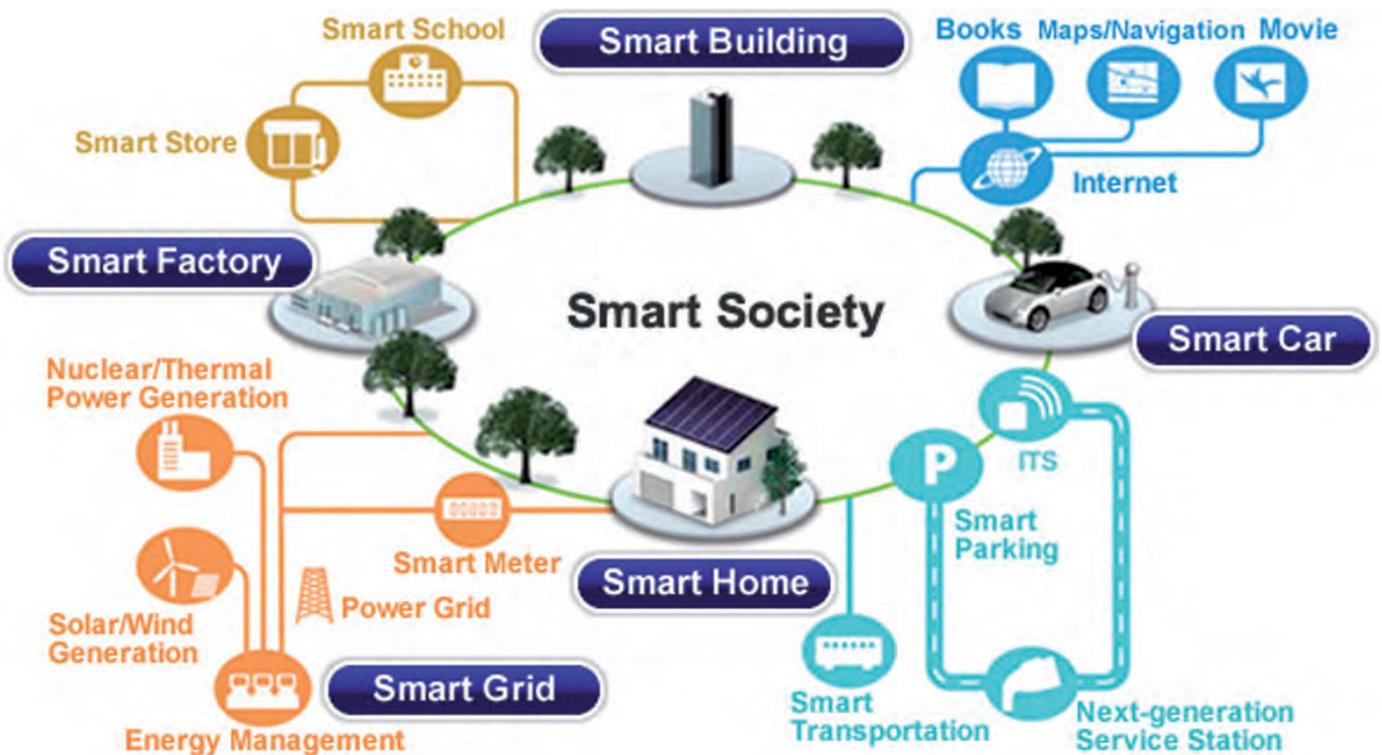
dentos tiempo ha, como la sanidad y el negocio, se van insertando en dichas soluciones componentes de inteligencia computacional, de tratamiento de datos para extraer información valiosa para mejorarlas. Así, en una "smart city" es posible abordar la gestión del tránsito de vehículos a partir de los registros de cámaras de vídeo y otros sensores. De modo que cabe decir que está naciendo un "cerebro" que nos ayuda a solventar dificultades por caminos que hasta hoy eran intransitables.

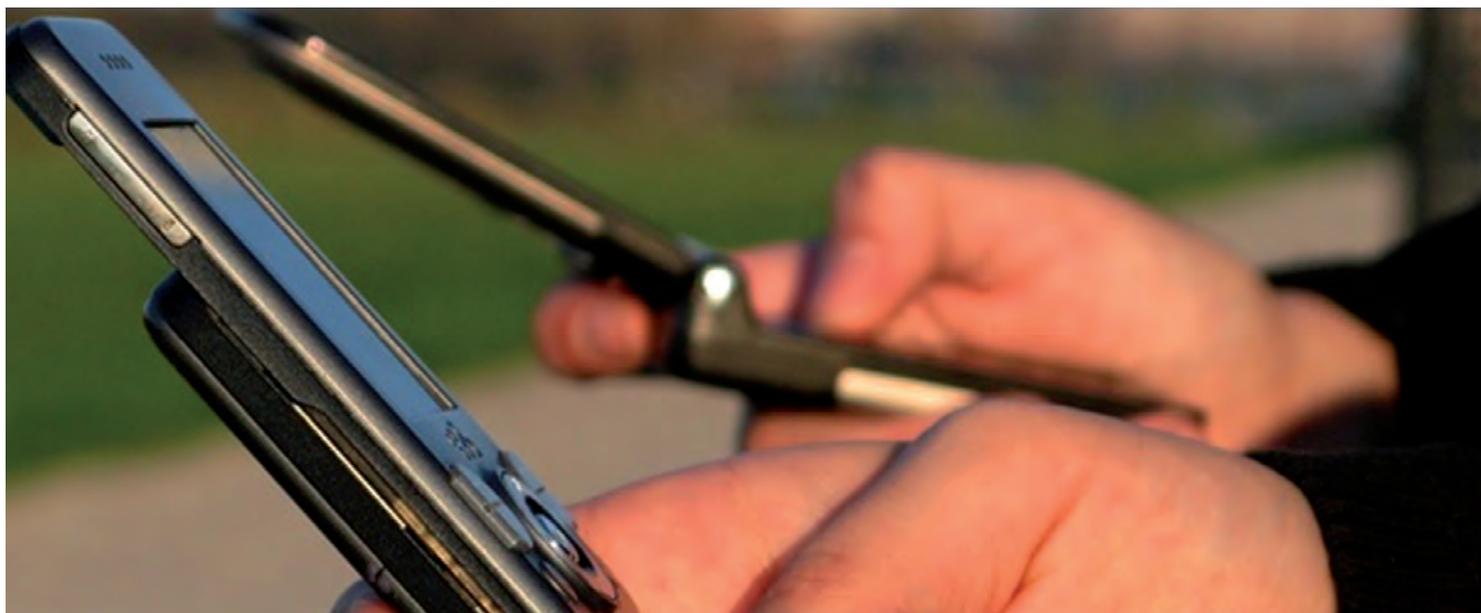
La que se llamó minería de datos, o extracción de información útil de amplios registros de datos, ha progresado a velocidad comparable. Al tiempo que nuevos algoritmos de procesamiento ofrecen prestaciones cada vez más sorprendentes, las posibilidades de registrar más variables y más valores se han multiplicado. Los profesionales de este sector han comprendido perfectamente que la consideración de grandes porciones de lo registrado posibilita la obtención de mejor información. Por ello apa-

recen las tecnologías conocidas como "big data", en que el carácter masivo y heterogéneo de los valores registrados no supone un obstáculo, sino un estímulo para su aprovechamiento. Pero, repito, la incorporación de estas tecnologías a las aplicaciones y servicios que se introducen en los ámbitos "e-" y "smart" crece lentamente. ¡Tal vez tenga que ser así! En cualquier caso, me alegra que se empiece a entender que el uso de "herramientas cognitivas" será tan imprescindible como lo ha sido –y será– el de las herramientas mecánicas.

Pese a ello, a mi juicio, se están descuidando aspectos fundamentales en la concepción de lo que debería ser en su conjunto, la "smart society" y que incluiría todos los fragmentos a que he aludido.

En primer lugar, siento preocupación precisamente por el modo inconexo en que se abordan problemas que no sólo son parecidos, sino que están fuertemente interrelacionados. Así, si bien "smart energy" va encontrando cabida en las "smart cities" –o al revés–, no abundan los ejemplos en que se establezca relación entre el fomento del empleo y el ámbito local, ni entre





las ofertas de ocio y el apoyo a los emprendedores. La realidad social es “*orgánica*”, en el sentido de inseparable en elementos independientes; y toda visión que no la considere así limita seriamente las posibilidades de progreso. Es, en mi opinión, hartamente negativo que cada sector o cada localidad aborde asuntos sin una coordinación que facilite la necesaria cooperación.

Por otra parte, los problemas de privacidad y de seguridad crecen, lógicamente, a medida que crece el tráfico de datos y el acceso a la información. Y no me refiero únicamente a los ataques víricos, sino a otros que precisan de instrumentos más precisos para defenderse: pongamos que distorsiones mantenidas de sistemas de recomendación por (hipotéticos) pares. Estos aspectos merecen una atención que no se les está brindando, y demandan unas herramientas que solo ahora se empiezan a diseñar. La profundidad de sus niveles no es pequeña: puede hacerse –y de hecho se hace– análisis de datos con propósitos perversos y para combatirlo, tiene que pensarse en sistemas que habría que llamar de “*contraminería*”, conceptualmente –pero no desde el punto de vista tecnológico– análogos a las contramedidas en el campo de la guerra electrónica, y también relacionados con la ciberseguridad y ciberdefensa, cuya presencia se ha extendido en lo que se refiere a instalaciones críticas y temas de interés estratégico.

Además, y creo que con más graves futuras consecuencias, se está conci-

biendo el “*cerebro*” que antes he mencionado como puramente artificial, ignorando que la inteligencia individual no es sustituible por la computacional, sino que ambas son complementarias, y aún más, que existe una inteligencia colectiva, que ha venido evolucionando desde que los humanos se volvieron sedentarios –si no desde antes–, cuya importancia no solo se postula, sino que se ha demostrado en infinidad de experimentos y situaciones reales en que el provecho de la agregación de las determinaciones de grupos o multitudes de personas –bajo las debidas condiciones de independencia y diversidad de información manejada por cada uno– supera de largo lo alcanzable individualmente. Una prueba clara la constituyen los “*electronic markets*”, en que las predicciones o las propuestas de los colectivos participantes superan los pronósticos de los expertos en muchos ámbitos de conocimiento.

Añadir –o mejor, agregar– la inteligencia humana en el diseño de los sistemas que empiezan a ayudarnos a vivir mejor –desde una perspectiva sostenible hasta una condición saludable– no es una opción: es una necesidad. Hay cuestiones –como la inserción social– en que la presencia de las personas es imprescindible. En otras –como la gobernanza– supondría (¿supondrá?) un paso de gigante hacia una mejor democracia. Y me permito reiterar que en muchas más en las que parece secundaria –como en el ámbito de la salud–, las interrelaciones –con la asistencia social,

con la inserción, con el propio empleo– llevan a concluir que no lo es.

Con gran acierto, **John Maynard Smith** y **Eörs Szathmáry** propusieron en “*Ocho hitos de la evolución*”, el deseable universal acceso a las actuales redes de telecomunicaciones y a la computación a través de ellas, como el último hito significativo. Y concluyen el texto afirmando que esta nueva forma de comunicación tendrá mayores consecuencias que la invención y expansión de la escritura, y hasta que la aparición del lenguaje; diciendo que, sin embargo, no se atreven a pronosticar cuáles serán esas consecuencias. ¿Por qué? Porque en nuestras manos están las que vayan a ser.

Hace unos meses, tuve la fortuna de leer en ABC una entrevista con la profesora **Saskia Sassen** (*Columbia University* y *London School of Economics*), cuya labor ha sido galardonada con el último Premio Príncipe de Asturias de Ciencias Sociales. La frase que cierra sus declaraciones es como sigue:

“Para que las tecnologías disponibles realmente alimenten las ciudades, la tecnología debe reflejar el conocimiento de los habitantes de la ciudad”.

Por eso, la concepción de la “*smart society*” y su subsiguiente despliegue, constituye verdaderamente, el desafío del siglo XXI.

Herramientas de corte: una reflexión histórica

Giampiero Pavese, Responsable de Producto y Aplicaciones de Sandvik Coromant Ibérica

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5813>

Fundada en 1862 por Göran Fredrik Göransson, el primero en tener éxito en el uso del método Bessemer para la producción de acero a escala industrial, Sandvik ha estado en el corazón de la industria de las herramientas de corte durante más de 150 años. A continuación, y con esa dilatada experiencia, hacemos un recorrido a lo largo de la historia de las herramientas de corte, desde los procesos industriales más importantes del siglo XVIII hasta la actualidad.

La historia de las herramientas de corte comienza con el “acero de crisol”, un proceso de refinado mediante el cual las formas de acero obtenidas por medio del martillado (entre ellas el acero de corte) se refundía para producir un material más uniforme. A pesar de que los procesos para producción de acero en crisol se remontan a hace más de 1.000 años, su popularidad aumentó durante la primera mitad del siglo XVIII, cuando un método conocido como “acero de crisol inglés” se utilizó para la fundición de la primera herramienta de corte de acero. Esta técnica (desarrollada por **Benjamin Huntsman**, un relojero inglés de *Sheffield*, que buscaba conseguir un acero de mayor calidad para los muelles de relojería) utilizaba un horno de coque capaz de alcanzar 1.600°C. Se colocaban diez o doce crisoles en el horno y cuando el crisol alcanzaba la temperatura de calor blanco se introducía el acero de “blister” troceado. Unas tres horas después, se “desescoriaban” las impurezas y el acero fundido se vertía en lingotes.

LOS AÑOS DEL TUNGSTENO

El siguiente cambio en la fabricación de herramientas tuvo lugar en 1868, cuando **Robert Mushet**, obrero siderúrgico de *Gloucestershire*, Inglaterra,

descubrió que la vida útil de la herramienta podía extenderse considerablemente añadiendo tungsteno al acero, incrementando así su dureza. Esto lo convirtió en la primera aleación comercial de acero, un material básico para el desarrollo de aceros de herramienta para el corte de metal. El impacto de este descubrimiento en las herramientas de corte actuales ha sido tan grande que el consumo mundial de tungsteno está en torno a 50.000 toneladas al año.

En 1894, **Frederick Winslow Taylor**, un ingeniero mecánico estadounidense de *Filadelfia*, llevó a cabo pruebas de mecanizado comparativas entre el “acero *mushet*” y el acero de herramientas de alto contenido en carbono. Concluyó que podía cortar un 41-47% más rápido a los aceros forjados y en torno a un 90% más rápido a los aceros dulces. Asimismo, descubrió que la aplicación de un flujo de agua como refrigerante incrementaba la velocidad de corte incluso un 30% más. Tras la publicación de los resultados de las pruebas de Taylor, el “acero *mushet*” y otros aceros autotemplables se hicieron populares en los talleres. Además de reducir la duración de los ciclos, los talleres también podían incrementar los intervalos de rectificado, realizar mayores cortes o mecanizar materiales más duros.

Los exitosos experimentos de Taylor con “acero *mushet*” le llevaron a ser contratado por la *Bethlehem Steel* para resolver un costoso problema de capacidad del taller. A continuación, puso en marcha un proyecto, con un compañero llamado **Maunsel White**, para experimentar con los procesos de templado para el “acero *mushet*” y otros aceros autotemplables. La pareja descubrió que, si el acero se calentaba hasta acercarse al punto de fusión, se creaba un metal de mayor duración que retenía su dureza hasta alcanzar el rojo vivo. Este metal fue el primer acero rápido (HSS o *High Speed Steel*), un desarrollo que allanó el camino para las operaciones de mecanizado de componentes de mucho mayor tamaño. El nombre de Taylor incluso fue asignado a una ecuación: la

ecuación para determinar la vida útil de las herramientas de Taylor (*Taylor Tool Life Equation*) establece una relación entre la vida útil de la herramienta y una o más variables del proceso de corte. Ésta se formula de la siguiente manera, $vT^n = C$, donde v es la velocidad de corte en m/min, T es la vida útil en minutos, C es la velocidad de corte para una vida útil de 1 minuto y n es el exponente Taylor. Los valores típicos de “ n ” pueden ser: 0,08-0,2 para HSS; 0,2-0,5 para metales duros; y 0,5-0,7 para cerámica.

La introducción del HSS fue muy reveladora y permitió a las herramientas de corte operar a hasta el doble y triple de las velocidades permitidas en el acero al carbono; duplicando y triplicando así también la capacidad de los talleres de todo el mundo. El HSS siguió siendo el referente del sector de las herramientas de corte durante las siguientes dos décadas, hasta que en 1920 aparecieron en Alemania los primeros carburos sinterizados y cementados para el corte del metal. El componente principal de estos materiales era el carburo de tungsteno en un aglomerante de cobalto. Con una dureza cercana a la del diamante, se descubrió que las herramientas de carburo de tungsteno podían operar a velocidades de corte muy superiores a las de las herramientas de HSS.

CEMENTANDO EL FUTURO

Los carburos cementados y sinterizados fueron creados por primera vez por un fabricante de lámparas, *Osram*, mientras la empresa buscaba una alternativa más barata a las hilas de diamante utilizadas para la producción del alambre de lámpara. En concreto, la empresa buscaba una dureza similar a la del diamante, pero con una tenacidad optimizada. No obstante, al no disponer del equipo necesario para explotar este material a escala industrial, *Osram* vendió la patente a una empresa llamada *Friedrich Krupp* (hoy en día *ThyssenKrupp*) a finales de 1925. En 1926 *Krupp* introdujo en el mercado el metal duro sinterizado bajo el nombre *WIDIA* (un acrónimo de *W*ie *D*IAmant, lo que significa “como diamante” en alemán).

La herramienta de corte resultante ofrecía velocidades de corte y avances

optimizados tan sobresalientes que los diseñadores de máquinas-herramientas se vieron obligados a replantearse las características de los diseños existentes para ofrecer una mayor rigidez y una mejor tecnología de soporte del eje.

Las puntas sin recubrimiento soldadas al mango fueron la primera forma de aplicación comercial del metal duro. Estas primeras calidades se aplicaron con mucho éxito a las operaciones de corte y de fresado de acero de fundición. Hasta mediados de 1930, la producción mundial de metales duros fue de en torno a las 10 toneladas anuales. No obstante, en 1935 los empleados de *Krupp/Osram* ya habían identificado las condiciones necesarias para el afino del grano de carburo de tungsteno y en 1939 descubrieron los efectos positivos de añadir una pequeña cantidad de carburo de tantalio y vanadio. Esto ayudó a controlar el crecimiento discontinuo del grano y resultó en la aparición de las calidades para el fresado de acero, con carburo de titanio y tantalio así como carburo de tungsteno y cobalto.

Como resultado, se crearon herramientas de corte con una resistencia al desgaste, una resistencia en caliente y una estabilidad de la oxidación considerablemente optimizadas. En comparación con el HSS de hace sólo 40 años, las velocidades de corte incrementaron de 25-50 m/min a 250 m/min para las operaciones de torneado y fresado de acero. Durante tres décadas, el carburo de tungsteno experimentó una gran evolución, convirtiéndose, poco a poco, en menos especializado y más ubicuo. Lo que se consideraba un tamaño de grano fino en una década, dejó de considerarse tan fino en la siguiente.

MARCADA PARA EL ÉXITO

Sandvik ha estado implicada en la fabricación de productos de metal duro desde 1932. El nombre de la marca *Coromant* se creó en 1942, tras la colaboración con *Luma-lampan*, Federación Cooperativa. Inicialmente, se desarrollaron los aceros para las brocas enterizas de punta de metal duro y, un año después, se fabricaron las primeras herramientas de corte de metal duro.

En 1950, *Sandvik Coromant* estaba desarrollando calidades de metal duro para las primeras plaquitas intercambiables del mercado. Estas llamadas pla-

quitas de usar y tirar se parecían a las herramientas soldadas, excepto en que el metal duro estaba asegurado en el alojamiento del soporte por un elemento de sujeción en lugar de por soldadura. Cuando el filo de corte se desgastaba, se disponía de un nuevo filo, simplemente, girando o reglando la plaquita.

1950 también fue testigo de la incorporación de los materiales cerámicos (alúmina) para las plaquitas de las herramientas de corte. Estos nuevos materiales permitían mecanizar a velocidades de hasta 610 m/min. Pero, las primeras plaquitas eran muy quebradizas y poco tenaces. Al final, no consiguieron ofrecer la fiabilidad exigida por el sector industrial y el carburo de tungsteno siguió siendo la calidad dominante del mercado. Hasta tal punto que *Sandvik Coromant* introdujo sus primeras calidades “premium” de carburo de tungsteno a lo largo de 1960, a la vez que el consumo global de carburo superó las 10.000 toneladas al año por primera vez.

No obstante, la cerámica no acabó en la pila de desechos, sino que en unos pocos años se introdujeron alúminas nuevas de mayor resistencia y composites de alúmina mezclados con partícu-

las cerámicas de titanio de metal duro. Los “*cermets*”, como se llaman hoy, son materiales *composites* de cerámica y de metal. Fueron diseñados para ofrecer las mejores propiedades de la cerámica, como la resistencia a las altas temperaturas, y la dureza de las placas de metal, como la gran resistencia a la deformación plástica.

LA DÉCADA DE REFERENCIA

Los ‘60 fueron la década de referencia por muchas razones. Por ejemplo, en 1961, se introdujo por primera vez la plaquita para torneado *Knux* de *Sandvik Coromant*, convirtiéndose en un éxito de ventas durante hasta 30 años. Al mismo tiempo, aparecieron las primeras herramientas de corte basadas en nitruro de boro cúbico (CBN), el segundo material más duro disponible después del diamante. La utilidad del CBN proviene de su insolubilidad en hierro, níquel y aleaciones relacionadas con ellos a altas temperaturas, mientras que el diamante es soluble en estos metales. El CBN encontró una aplicación casi exclusiva en el torneado de aceros templados. Las calidades de CBN son composites cerámicos con un contenido del 40-65% de



Plaquita de metal duro

CBN. El aglomerante cerámico añade resistencia al desgaste al CBN, que tiene de al desgaste químico. Otro grupo de calidades son las de alto contenido en CBN, que contienen entre un 85% y un 100% de CBN. Estas calidades pueden contener un aglomerante metálico para incrementar su tenacidad.

A mediados de 1960, comenzaron las primeras investigaciones relativas a la aplicación de una fina capa de recubrimiento en las herramientas de metal duro, a través de un proceso de alta temperatura basado en la deposición química de vapor (CVD). En 1969, *Sandvik Coromant* fue la primera en comercializar plaquitas de metal duro con recubrimiento (recubrimiento gamma – GC). Este recubrimiento era una fina capa (~5 µm de grosor) de carburo de titanio que optimizó la vida útil de la herramienta en una relación de 2 a 5. Además, ese mismo año fue testigo del lanzamiento de las primeras herramientas de corte específicas para máquinas de control numérico.

En lo referente a la innovación, 1970 no se quedó atrás. Por ejemplo, durante este periodo, se desarrolló un material de herramienta basado en nitruro de silicio (Si₃N₄). Frente a las cerámicas de alúminas simples, las herramientas cerámicas Si₃N₄ ofrecieron una mayor resistencia a la rotura ante choques me-

cánicos y térmicos debido a su mayor resistencia a la flexión, tenacidad y conductividad.

A principios de 1970, también vio la luz el *Sialon*, un material cerámico para herramientas de corte. La presión en caliente y la sinterización de una mezcla de polvos de Si₃N₄ y Al₂O₃ ofrecían a esta excelente herramienta de composites cerámicos una gran dureza en caliente, gran tenacidad y alta resistencia al desgaste. Además, *Sandvik Coromant* introdujo, por primera vez en esta década, barreras térmicas de óxido de aluminio en las plaquitas.

PERIODO DE AUGE

Los años anteriores a la globalización representaron la era dorada para el corte del metal en las economías occidentales. Un estudio realizado a principios de 1970 estimó que había unos 2.692.000 de máquinas-herramientas sólo en EEUU, con un coste de explotación anual de 64 mil millones de dólares. Por este motivo, el uso de innovadoras herramientas de corte para reducir los costes fue el objetivo principal de todos los talleres del mundo. Para 1978, los productos de metal duro de *Sandvik Coromant* suponían la mitad de las ventas del grupo *Sandvik*.

Los metales duros combinan la dureza en caliente y la resistencia de los carburos metálicos (WC, TiC, TaC) o nitruros de carbono (p. ej. TiCN), con la tenacidad y plasticidad de un aglomerante de aleación metálica (Co, Ni, Fe), donde las partículas duras se distribuyen uniformemente para crear composites metálicos. Incluso a día de hoy, debido a sus excelentes propiedades de corte, estas calidades tienen una sólida posición en la industria de las herramientas.

Entre tanto, los materiales cerámicos y cermets siguieron suponiendo una elección de herramienta de corte alternativa para determinadas aplicaciones. El nitruro de silicio de alta tenacidad, la alúmina de tenacidad incrementada y la alúmina reforzada con triquitas de carburo de silicio aparecieron a finales de 1970, principios de 1980.

1980 fue testigo de la introducción de varios tipos de herramienta de tanto éxito que incluso a día de hoy existen generaciones modificadas y optimizadas de las mismas. Por ejemplo, en

1981, *Sandvik Coromant* lanzó por primera vez la broca Delta, de mayor capacidad que las brocas helicoidales convencionales, y, tres años más tarde, introdujo la primera T-Max U-lock para el torneado de roscas. Asimismo, en 1980 llegó una tenacidad incrementada para sustratos de mayor gradiente funcional.

LOS AÑOS DEL DIAMANTE

Por lo que probablemente más se recuerden los años 80 es por ser testigo de las primeras herramientas de corte con base de diamante, utilizadas en una amplia gama de aplicaciones de mecanizado. Esto supuso una nueva revolución en la historia del corte del metal. Las herramientas de diamante policristalino (PCD) se componen de una capa (0,5 a 1,5 mm) de grano fino, con partículas de diamante aleatoriamente orientadas, sinterizadas con un aglomerante apropiado (normalmente cobalto) y después aglutinadas metalúrgicamente en un sustrato como el metal duro o Si₃N₄.

El PCD presentaba una excelente resistencia al desgaste, filos agudos, baja fricción en el corte, alta tenacidad y buena conductividad térmica. Estas propiedades contribuían a prolongar la vida útil de las herramientas en las operaciones de mecanizado convencional o de gran velocidad, de materiales no féreos y no metálicos. Sin embargo, dada la alta solubilidad del diamante (carbono) en estos materiales, a altas temperaturas, no era un material indicado para el mecanizado de metales féreos.

Pero la euforia inicial en torno al PCD se vio ligeramente sofocada con el descubrimiento de sus desventajas. De hecho, aparte de los altos costes de herramienta, la presencia del aglomerante (cobalto) reducía la resistencia al desgaste y la estabilidad térmica.

La respuesta llegó a principios de 1990 con la introducción de las herra-



Insertos cerámicos con mucha mayor resistencia al calor comparados con el carburo



mientas de metal duro con recubrimiento de diamante. Estas capas de diamante, de un grosor habitual de hasta 200 μm , se producían con el método CVD y pronto ganaron popularidad entre plaquitas, brocas, escariadores y fresas de ranurar por igual. Frente a las herramientas de PCD, las ventajas de las herramientas con recubrimiento de diamante incluían el hecho de que no contenían aglomerante, ofreciendo así una mayor resistencia térmica y al desgaste.

INNOVACIÓN CONSTANTE

Otro gran paso en la tecnología de las herramientas de corte tuvo lugar en los '90 y llegó en la forma de un nuevo tipo de plaquita intercambiable para operaciones de acabado. Las plaquitas "wiper" con geometría especial se introdujeron para ofrecer a las piezas de trabajo un buen acabado, incluso a velocidades de avance superiores a las convencionales. De hecho, al utilizar las plaquitas "wiper" modernas, el avance por vuelta puede incrementarse, aproximadamente, hasta cuatro veces, a la vez que se mantiene una buena calidad superficial.

El nuevo milenio trajo muchos avances pioneros en el campo de las herramientas de corte para las súperaleaciones termorresistentes y los composites; otras innovaciones incluyen el sistema de fresado de cabeza intercambiable CoroMill 316 y las herramientas de metal duro con refrigerante de alta presión integrado. El año pasado, Sandvik Coromant presentó GC4325, una calidad de nueva generación con recubrimiento de metal duro para el torneado de acero. Esta innovación en material de herramienta ofrece un mayor potencial para el incremento de las velocidades de corte y una vida útil de herramienta más prolongada y predecible. La premisa para los desarrollos en herramientas de corte siempre ha sido la misma: deben ser más duras que los materiales de las piezas mecanizadas para resistir así el calor generado y ofrecer buena vida útil. Los siguientes 150 años serán testigo de tanta innovación como estas últimas décadas, si no más.



CoroTurn HP para materiales HRSA con dispositivo refrigerante

Bosch inside.

Eficiencia que funciona.



Confíe en los expertos y en las tecnologías orientadas al futuro para mayor eficiencia y rentabilidad.

El uso eficiente de la energía es un factor clave para mantener la competitividad. Ya sea para la industria, los negocios, instituciones privadas y públicas o las empresas de suministros energéticos, le ayudamos a encontrar la solución óptima ajustada a sus necesidades. Nuestra gama de productos varía desde la producción de calor en sistemas de calderas industriales de vapor, agua caliente y sobrecalentada hasta unidades de cogeneración. Los altísimos estándares de calidad y amplios servicios ofrecidos por Bosch garantizan la durabilidad, la rentabilidad y el funcionamiento sostenible de su instalación.

www.bosch-industrial.com



BOSCH

Innovación para tu vida

Desarrollo en España de empresas de servicios para la gestión eficiente de los procesos energéticos

Jesús Morcillo Bellido y Bernardo Prida Romero de la Universidad Carlos III

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5861>

1. INTRODUCCIÓN

Es innegable la importancia creciente del sector servicios - tanto por su peso económico como por sus efectos sobre el empleo - en los países desarrollados; lo que quizá sea menos conocida es la forma en que algunos servicios innovadores se están desarrollando e integran-

do en la economía del siglo XXI, tanto en las organizaciones privadas como públicas.

En este artículo se estudia precisamente uno de estos nuevos conceptos a través de un modelo de servicios que busca la gestión eficiente de la energía consumida por diferentes tipos de organizaciones, denominado ESCO (*Energy Service Company*), basado en acuerdos de colaboración cliente-proveedor. En estos acuerdos el proveedor se compromete a garantizar, dentro de un determinado "nivel de servicio" previamente acordado, unos objetivos de ahorro en

la energía consumida por el cliente, superiores a los que éste habría podido conseguir trabajando aisladamente.

El proveedor logra así su propia compensación económica a través de la retención de parte del ahorro conseguido en el coste energético integral durante un determinado periodo de tiempo; es decir, la propia eficiencia del modelo genera los flujos de caja precisos para cubrir el coste de su operación y proporcionar un cierto rendimiento, en forma de ahorro/margen para los partícipes.

2. LA ENERGÍA COMO FACTOR DE COMPETITIVIDAD Y EL MODELO DE EMPRESA DE SERVICIOS TIPO "ESCO"

El consumo de energía en países con una fuerte dependencia de fuentes exteriores de suministro, como España, puede tener un efecto importante en la competitividad industrial, baste señalar

ALEMANIA

Tipo de ESCO	Proyectos privados y público - privados Presencia de compañías multinacionales (Dalkia, Cofely y Siemens)
Número	Más de 500 empresas activas (unas 50 destacadas por mayor actividad)
Volumen de negocio	Estimado 2000-2400 mill. de euros (2010).
Aplicaciones	Calefacción y cogeneración
Principales proyectos	Edificios públicos, industrias y oficinas

FRANCIA

Tipo de ESCO	Dos empresas, subsidiarias de las grandes empresas energéticas francesas, dominan el mercado (Dalkia y Cofely)
Número	En total más de 500 empresas activas
Volumen de negocio	2.000 mll. de euros (2010).
Aplicaciones	Calefacción, cogeneración e iluminación. Plan de acción del gobierno francés para reducir un 38% en edificios y un 40% en el sector residencial
Principales proyectos	Edificios públicos, hospitales, bancos y centros docentes

REINO UNIDO

Tipo de ESCO	Subsidiarias de grandes empresas energéticas y constructoras (6 compañías representan el 80% del mercado)
Número	Estimadas 25 empresas activas
Volumen de negocio	1.000 mill. de euros (estimación 2010)
Aplicaciones	Iluminación, cogeneración y calefacción
Principales proyectos	Edificios públicos, industrias y oficinas

Tabla 1: Estado de las empresas tipo ESCO en diferentes países. Basado en Hansen [10]

- a modo de ejemplo – que el coste energético integral de un televisor de LCD se estima en un 45% del coste total del producto [1].

Las iniciativas encaminadas a reducir los costes energéticos de los productos son muy diversas, lo mismo que sus resultados. Entre estas iniciativas cabe destacar:

- las iniciativas europeas para promover el transporte combinado intermodal [2], en el ámbito de la logística
- las experiencias llevadas a cabo en la industria de embalajes en Estados Unidos [3] y en España [4]
- aplicaciones “lean” en el ámbito de la cadena de suministro para redu-

cir el desperdicio energético [5]

- iniciativas de reducción del impacto ambiental mediante el cálculo de la huella de carbono [6].

El modelo de empresa tipo ESCO se enmarca dentro del conjunto de iniciativas encaminadas a la búsqueda de la mejora de la competitividad en las organizaciones a través de una gestión más eficiente de la energía, esto tiene implicaciones tanto en los costes como en la mejora de la calidad de vida que se consigue en el entorno en el que tales organizaciones se encuentran radicadas.

Algunos autores [7], incluyen este tipo de iniciativas dentro del capítulo de innovación a partir del uso de nuevas tecnologías combinadas con nuevos modelos de gestión, basados en la colaboración entre organizaciones. Otros autores [8], enfatizan que los modelos básicos de ESCO se basan sobre todo en un sistema de compensación económica en el que caben diversas combinaciones de acuerdos y contratos entre partes,

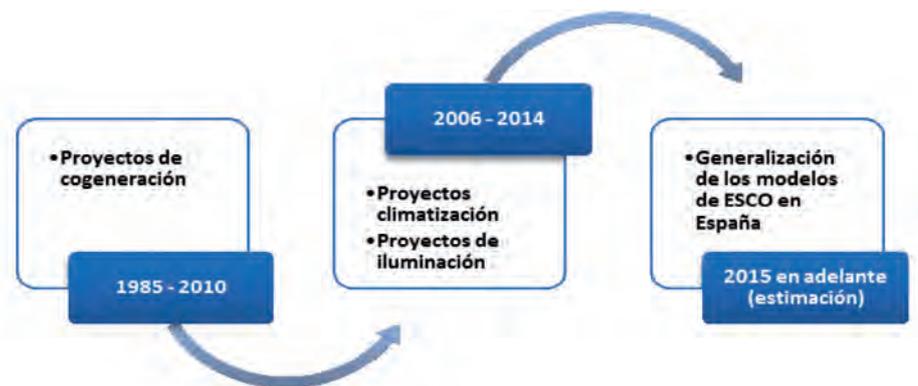


Fig. 1: Evolución de los modelos ESCO en España. Elaboración propia a partir de expertos

Oficinas	<ul style="list-style-type: none"> • Áreas: iluminación (20%), equipos (35%) y climatización(40%) • Consumo anual/ empleado: 2.453 kWh/empleado • potencial de ahorro: 25-40%
Hospitales	<ul style="list-style-type: none"> • Áreas: Iluminación (10%) y climatización (36%) • Consumo anual/cama: 29.199 Kwh/cama • Potencial de ahorro: 20-40%
Hoteles	<ul style="list-style-type: none"> • Áreas: Equipos (30%), climatización (30%), iluminación (12%) • Consumo anual por estancia: 19 kWh/estancia • Potencial de ahorro: 15-35%
Universidades	<ul style="list-style-type: none"> • Áreas: iluminación (20%) y climatización(65%) • Consumo anual por alumno: 406 kWh/alumno • Potencial de ahorro: 25-35%
Alumbrado urbano	<ul style="list-style-type: none"> • Áreas: Iluminación (100%) • Consumo anual por habitante: 73 kWh/habitante • Potencial: 40-60%
Centros comerciales	<ul style="list-style-type: none"> • Áreas: Iluminación (25%) y climatización (48%) • Consumo anual por m2: 325-400 kWh/m2 • Potencial de ahorro: 15-40%

Fig. 2: Tipos de proyectos susceptibles de constituir modelos ESCO. Fuente: Energen[11]

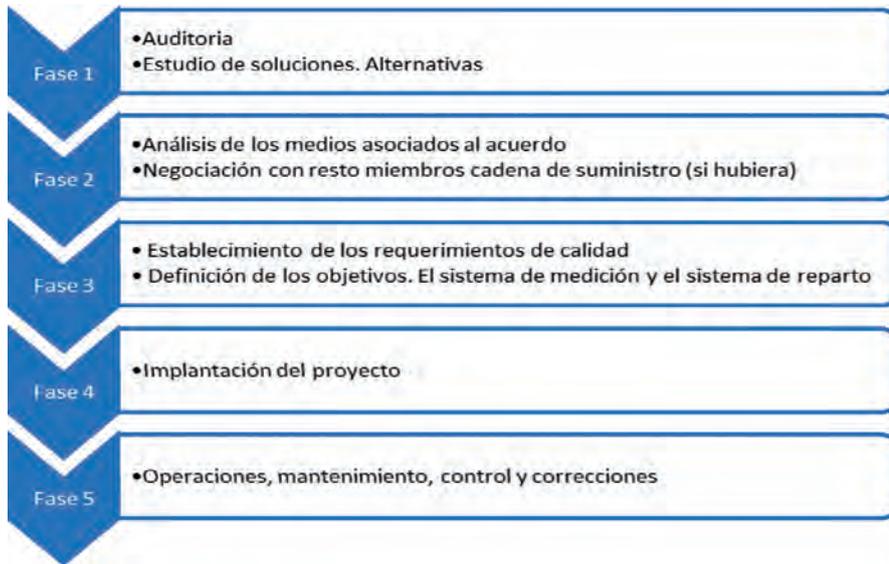


Fig. 3: Fases en un proyecto ESCO. Fuente: elaboración propia

basados en un compromiso de cumplimiento de un “nivel de servicio” energético previamente acordado [9].

Una empresa ESCO ha de invertir en tecnologías más eficientes, que en muchos casos instala e incluso financia y mantiene durante un determinado número de años establecidos en el acuerdo y por tanto suele ser responsable de la coordinación y gestión de los diferentes elementos que aportan la solución energética final al cliente, aunque el cliente también suele poder definir que componentes del proceso van a ser subcontratados y cuáles seguirán – dentro la estructura integral del proceso - siendo internos a su empresa.

Este tipo de acuerdos lleva ya bastantes años realizándose en Estados Unidos, pero en Europa es aun relativamente nuevo, siendo la Directiva de la Unión Europea (UE) 2006/32/CE la que estableció las bases del tipo de empresas ESCO en Europa: i) establece

objetivos de eficiencia energética para el año 2016 ii) define las características que deben de cumplir las empresas ESCO iii) anima a que el pago de los servicios prestados por estas empresas se base total o parcialmente en objetivos de eficiencia energética iv) enfatiza la necesidad de fomentar acuerdos con instituciones financieras que proporcionen la adecuada financiación de los proyectos v) recomienda al sector público crear las primeras buenas prácticas que sirvan de punto de referencia.

Como se puede apreciar en la Tabla 1, el desarrollo es muy diferente en los diferentes países en la que se aplican los modelos ESCO.

Alemania es un país de referencia en el desarrollo de proyectos tipo ESCO. Se estima que el inicio del desarrollo de los servicios de eficiencia energética tuvo lugar en 1995, con el establecimiento de los llamados *Energy Saving Partnerships* a través de los cuales – con el apo-

yo de las autoridades alemanas – un gran número de edificios eran gestionados como “conjuntos energéticos” con el fin de obtener mayor eficiencia en el consumo energético [10]. En el año 2006, ya se habían organizado 26 “conjuntos” que reunían 1300 edificios. El éxito del modelo ESCO en este país podría estar fundamentado tanto en el apoyo de las autoridades federales y regionales como en la alta importancia que los gestores privados dar a la reducción de los costes energéticos.

En Francia, los servicios energéticos públicos han estado tradicionalmente - desde finales del siglo XIX - gestionados por empresas privadas en modelos de “gestión de servicios delegados” y esto creó una base financiera sólida para la evolución de las empresas tipo ESCO en los últimos años. Aunque su forma habitual de acuerdo difiere de los modelos más habituales en otros países, como Alemania, ya que suele comprometer la optimización de la gestión de las instalaciones existentes, sin mejoras tecnológicas adicionales. En el Reino Unido, el modelo se desarrolló a partir de los proyectos de calefacción centralizada y fue la entrada en el mercado de compañías como *Shell* y *British Petroleum*, a través de compañías subsidiarias, lo que hizo que el mercado acelerase su desarrollo.

3. ESTUDIO DE LAS EMPRESAS ESCO EN ESPAÑA

A continuación se presentan los resultados del estudio realizado sobre este tema a partir de los datos obtenidos en publicaciones especializadas, entrevistas abiertas con responsables de varias organizaciones muy relevantes (*Philips*, *Endesa* y *Telvent*) que operan en el sector e “identificación de buenas prácticas” facilitadas por organizaciones emprendedoras en este ámbito contactadas a través de la *Asociación Española de Empresas de Eficiencia Energética* (ANESE).

3.1. SERVICIOS OFRECIDOS EN ESPAÑA

A pesar de que el modelo de servicios tipo ESCO - mencionado anteriormente - sea aún muy reciente, cabe decir que existen en España algunos precedentes que merecen ser mencionados:

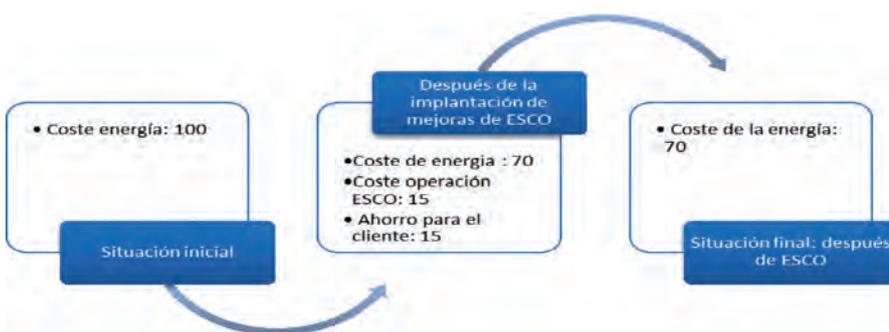


Fig. 4: Evolución de la tipología proyectos ESCO en España. Elaboración propia

a finales de la década de los ochenta, comenzaron a realizarse los primeros proyectos en torno a la cogeneración. *Sinae* (empresa participada por *Mapfre*, *Atisae* e *IDAE*) fue un claro ejemplo de organización que llegó a poner en marcha plantas de cogeneración en hospitales, centros comerciales, empresas de cerámicas, etc.

Como puede apreciarse en la Fig. (1), la siguiente etapa de los proyectos de eficiencia energética se ha centrado tanto en los proyectos de climatización como de iluminación que poco a poco han ido confluyendo hacia un servicio integrado que es lo que actualmente está comenzando a ofrecerse a través del modelo ESCO.

En el año 2010 se regula en España la actividad de las empresas dedicadas a este tipo de proyectos de colaboración y se establece que las ESCO deben de asumir el riesgo del proyecto, cobrando en función de los rendimientos, es decir, de la eficiencia energética lograda. En línea con esta legislación, las empresas ESCO deben de caracterizarse por:

- garantizar los ahorros energéticos y el suministro con el mismo nivel de servicio a un menor coste, mediante proyectos de eficiencia energética
- desarrollar e implantar proyectos de eficiencia energética
- obtener su remuneración directamente a partir de la eficiencia energética lograda
- financiar o apoyar la consecución de la financiación de estos proyectos por parte del usuario.

A pesar de que no exista un mercado claramente definido, podemos decir que la *Asociación Nacional de Empresas de Eficiencia Energética* (ANESE) referencia en la actualidad unas 130 empresas en este ámbito, si bien - según datos del *Instituto para la Diversificación y la Eficiencia Energética* (IDAE) y considerando como criterio de selección un tamaño mínimo de 250 trabajadores - nos quedaríamos con no más de 60 empresas capaces de abordar proyectos de cierta complejidad técnica y económica. Si considerásemos las empresas activas en procesos de instalación y mantenimiento de instalaciones de todo tipo, agrupadas en la *Asociación de Grandes Empresas Instaladoras*, podríamos estimar el número de posibles concurrentes en este mercado en unos 30.

En cualquier caso, cabe destacar la dificultad de la identificación de empresas en el ámbito de las ESCO dada la diversidad de proyectos existentes, que pueden ir desde sencillos proyectos de iluminación en una urbanización con un periodo de recuperación de la inversión entre 2 y 4 años, a otros mucho más complejos cuyos periodos de retorno podrían estar en los 8-10 años.

Con el fin de identificar tipos concretos de proyectos así como su potencial, en la Fig. (2) se presentan los más destacados en cuanto a potencial de ahorro.

3.2. MODELOS DE ACUERDO ESCO EN ESPAÑA

El tipo de acuerdo depende de la negociación concreta entre las partes, aunque siempre están basados en niveles de servicio específicos y en los ahorros logrados, por tanto suele ser precisa la estructuración del proyecto según una serie de fases como las establecidas en la Fig. (3) y que se siguen en la práctica totalidad de los proyectos. Esta forma sistemática de trabajar también ayuda a que no sean olvidados pasos importantes y por lo tanto conduce a obtener una mayor tasa de éxitos.

No obstante podemos diferenciar dos tipos de acuerdo:

- a. Acuerdos de suministro energético en los que el cliente paga por la energía útil consumida al precio acordado. En este caso, i) las medidas de eficiencia energética se limitan habitualmente al suministro de energía al edificio o instalación, ii) el cliente paga un valor a la ESCO en base a la factura eléctrica menos un porcentaje de ahorro. Los ahorros generados se destinan a financiar el proyecto de eficiencia energética.
- b. Acuerdos de rendimiento energético en los que el pago de los servicios se basan - total o parcialmente- en la obtención de mejoras de eficiencia energética y en el cumplimiento de los objetivos establecidos en el acuerdo, manteniéndose el ahorro como estructural para el cliente incluso después de finalizado el acuerdo, según se puede apreciar en la Fig. (4).

Respecto a la forma de materializar el acuerdo cliente-proveedor, normal-

mente en España se realiza mediante un contrato formal en el que existen varias formas de repartir entre los socios los ahorros conseguidos en los proyectos:

- Ahorro garantizado: la ESCO garantiza al usuario unos determinados ahorros
- Ahorro compartido: la ESCO gestiona los ahorros y compromete con el cliente un reparto determinado

4. BARRERAS QUE ENCUENTRAN LAS ESCO PARA SU DESARROLLO EN ESPAÑA

A partir de las entrevistas en profundidad realizadas a responsables de tres de las principales empresas que operan en el sector y contrastado con otros participantes en el estudio que han sido contactados a través de la *Asociación Nacional de Empresas de Servicios Energéticos* (ANESE), se han identificado las siguientes barreras:

1. Financieras y económicas.

- a. dado que existe presión por recuperar la inversión en un plazo medio (3-5 años) y que el precio de la energía no es aún considerado por las empresas suficientemente crítico, las inversiones tecnológicas -que consiguen mayores tasas de ahorro pero también necesitan mayor tiempo para la recuperación de la inversión- se ven limitadas
- b. aunque a veces se opte por implantar proyectos en etapas, en este caso la falta de "visibilidad" del proyecto hace que el interés de los inversores disminuya
- c. las dificultades actuales de financiación de las empresas españolas inciden adicionalmente de forma negativa en estos proyectos y paradójicamente el pequeño tamaño de muchos de estos proyectos resta interés a los inversores institucionales

2. Barreras legales

- d. dificultades en los contratos públicos (en los casos de contratación público-privada)
- e. dificultades para adaptar los contratos a los requerimientos específicos de los clientes

- f. dificultad de encajar en la legislación española modelos de éxito en otros países

3. Desconocimiento de los usuarios

Como en todo nuevo modelo de negocio, los clientes desconfían de algo que no conocen suficientemente. Asimismo la limitada disponibilidad de referencias de éxito, verificables de forma neutral, también dificulta su desarrollo.

4. Desconfianza

Generada en las propias ESCO hacía los clientes oportunistas que interpretan que el modelo se basa en que una organización externa se va a hacer responsable de la eficiencia de sus procesos energéticos y su correspondiente riesgo sin prácticamente responsabilidad por su parte.

5. CONCLUSIONES

El modelo de empresas dedicadas a proyectos tipo ESCO, que está comenzando a surgir en España, puede constituir una forma innovadora de impulsar la innovación (tanto en empresas públicas como privadas) y tiene un alto potencial de transformación por su impacto tanto en la estructura como en la forma de operar las actuales cadenas de suministro y su evidente influencia tanto en la empleabilidad como en el impacto medioambiental de las mencionadas cadenas de suministro.

Sin embargo, las barreras que se mencionan para su desarrollo en nuestro país indican dificultades para su expansión que no hay que despreciar si se pretende materializar realmente las ventajas potenciales apuntadas.

Paradójicamente a pesar de lo señalado y de las actuales dificultades de financiación en España, los aspectos económicos no parecen mostrarse como la barrera más complicada de superar ya que existe una gran variedad de posibles proyectos que van desde aquellos muy sencillos a otros de complejidad y alcance mayor. El utilizar el “*efecto demostración*” con pequeños proyectos puede permitir un aprendizaje gradual y la superación de la barrera de la “*confianza*” necesaria para este tipo de proyectos.

Es en este último aspecto, la obtención de la confianza mutua necesaria

en todo modelo de cooperación cliente-proveedor es donde pueden encontrarse las mayores dificultades, puesto que aunque existen experiencias destacables en otros ámbitos de la cadena de suministro [12] no son prácticas suficientemente difundidas en las organizaciones españolas y sus implicaciones van mucho más allá de los puros aspectos económicos y contractuales, ya que debe entenderse que “competencia” y “cooperación” son los elementos presentes en cualquier tipo de relación cliente-proveedor, pero encontrar el equilibrio adecuado a cada relación no es tarea fácil para la gestión y mucho menos cuando existen “asimetrías” en la relación respecto al conocimiento y a la percepción del riesgo de la misma.

La estrategia de colaboración entre empresas en este ámbito precisa ser cimentada en una “confianza mutua” que solo puede ser desarrollada a través de un “aprendizaje conjunto” de los usos energéticos en los procesos y su potencial mejora en la gestión. Para hacer posible dicho aprendizaje también se precisa cierta flexibilidad tanto en el planteamiento de los objetivos como en la implantación de las soluciones.

PARA SABER MÁS

- [1] Mohr S, Somers K, Swartz S et al. “Manufacturing resource productivity”, McKinsey Quarterly. June 2012, p. 20-25
- [2] Aliseda R. City “Logistics: logística inteligente para ciudades inteligentes”. Logiciel nº 75. Enero 2013, p. 71-77
- [3] Dobbs R, Oppenheim J, Thompson F. “Mobilizing for a resource revolution”. Mc Kinsey Quarterly, Sustainability & Resource Productivity Practice. January 2012, p.4-12
- [4] Centro Español de Logística. “Estudio para la introducción de nuevos formatos de palet en España. Jornadas CEL/Chep”. Cuadernos del Centro Español de Logística. Volumen especial. Octubre 2012, 42 p.
- [5] Bonini S. “The business of sustainability: McKinsey Global Survey results. McKinsey Quarterly. October 2011, p. 1-12
- [6] Trappey A, Trappey C, Hsiao Ch et al. “System dynamics modeling of product carbon footprint life cycles for

collaborative green supply chains”. International Journal of Computer Integrated Manufacturing. January 2012.Vol.25, p.934-945. Doi:10-1080/0951192x.2011.593304

- [7] Hartley J. “Innovation in governance and public services: past and present.” Public Money and Management. October 2005.Vol 25, p.27-34. Doi:10.1111/j.1467-9302.2005.00447.x
- [8] Bertoldi P. *Latest development of energy saving companies across Europe – An European ESCO update*. Institute for Environment and Sustainability. European Commission. 2007. 118p. ISBN: 978-92-79-06965-9
- [9] Vine E. “An international survey of energy service company (ESCO) industry”, Energy Policy. July 2005. Vol 33, p. 691-704. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2003.09.014>
- [10] Hansen S. *ESCOs around the world: lessons learned in 49 countries*. The Fairmont Press, 2009, 377p. ISBN: 978-1-4398-1101-6
- [11] Asociación Española de Agencias de la Energía. Manual de Promoción de ESE. Julio 2011. P. 21-32
- [12] Ponce E, Prida B. *La logística de aprovisionamientos para la integración en las cadenas de suministros*. Prentice Hall, 2006. 269p. ISBN: 978-84-8322-324-6

La sinergia entre el diseño de planta industrial y mantenimiento-explotación eficiente.

Un ejemplo de éxito: el caso Martínez Loriente S.A.

F. Javier Cárcel-Carrasco¹, Carlos Roldán-Porta¹ y José Grau-Carrión²
¹ Universidad Politécnica de Valencia
² Director ingeniería grupo Martínez Loriente S.A.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5856>

1. INTRODUCCIÓN

A la hora de planificar nuevas industrias en el sector agroalimentario, en numerosas ocasiones, prima el factor económico (a corto plazo) obviando un punto de vista a más largo plazo, con factores que fomentarían una mejor explotación y mantenibilidad de la industria, un mayor grado de fiabilidad, así como proponer un mayor número de acciones de mejora medioambiental. Este sector industrial, en continua transformación, orientado hacia acciones de calidad, economía en la producción y aceptación del cliente final, plantea retos que pueden ser considerados de mayor incidencia que en otros procesos de otros tipos de industrias manufactureras.

Cuando se planifica un proceso de construcción de nuevas plantas industriales con el fin de aumentar el nivel de producción o servicio, las decisiones tomadas marcan en medio y largo plazo la trayectoria de la empresa. En este artículo se presentan las instalaciones, experiencias y decisiones tomadas por la propia Dirección de ingeniería y mantenimiento de la compañía, y apoyadas por el Presidente y la Dirección general de la empresa *Martínez Loriente S.A.*, con una meta orientada hacia la adecuada explotación y mantenimiento, con un compromiso fundamental en la consecución de la correcta mantenibilidad, eficiencia operativa, energética y respeto medioambiental.

En este estudio se muestran algunas

de las decisiones principales para realizar una planta industrial modélica, que demuestra un avance respecto a las soluciones típicas en este ámbito.

2. ANÁLISIS DE PRINCIPIOS

El diseño de una planta industrial debería estar basado en la mejor operación para la fiabilidad y economía del proceso [1-3], el mantenimiento adecuado para conseguir sus fines y un respeto medio-ambiental [4].

Es por lo anterior que la tendencia industrial actual se ha esforzado en lograr que las instalaciones de producción sean cada vez más eficientes [5], con la máxima disponibilidad posible [6], distribuyendo a los departamentos de tal manera que influyan positivamente en la forma en la que la planta opera [7-8].

Partiendo de la experiencia operativa de Martínez Loriente S.A. (en una planta industrial anteriormente construida en otra población y actualmente en funcionamiento), y teniendo en cuenta las consideraciones generales para el adecuado proyecto del proceso productivo y una filosofía de calidad total, se apuntaron como principios fundamentales del diseño e implantación de sus instalaciones los siguientes:

- Diseño basado en la fiabilidad.
 - Sistemas redundantes para evitar paradas en producción.
 - Posibilidad de actuaciones rápidas ante averías (Sustitución de componentes).
- Diseño basado en la mantenibilidad.
 - Mantenimiento eficiente y económico.
 - Espacios para mantenimiento adecuados.
 - Diseño para utilizar las mejores técnicas organizativas de manteni-

miento (TPM, RCM).

- Personal de mantenimiento implicado y motivado.
- Diseño basado en la eficiencia energética y energías alternativas.
 - Sistemas térmicos, fluidos y eléctricos con menor necesidad energética.
 - Apoyo mediante energías renovables.
- Diseño basado en el respeto medio ambiental.
 - Materiales de instalaciones degradables y respetuosos con el medio ambiente.
 - Aguas residuales reutilizables.
 - Captación de aguas pluviales para utilización en actividades secundarias.
- Diseño basado en la información y la gestión del conocimiento.
 - Recopilación de experiencias operativas maniobras de instalaciones.
 - Sistema de información técnica Scada de toda la factoría.
 - Gestión del conocimiento tácito de los técnicos operativos de mantenimiento.

3. LAS INSTALACIONES Y LOS PROCESOS EN EL DISEÑO Y EJECUCIÓN

En la industria cárnica los parámetros de calidad necesarios son amplios y en continua superación, con continua evaluación de la demanda energética [9]. Es lógico que en el planteamiento del diseño de una nueva factoría (Figura 1), dichos valores quieran estar implícitos desde un inicio. Una fase del comienzo del éxito es amplificar la sinergia entre los grupos intervinientes: Ingeniería, empresas instaladoras y montadoras, y sobre todo, el propio conocimiento de la organización (que son los que de verdad saben que quieren, necesitan, y cómo operan), y que fomentan la colaboración y optimizan la cadena de suministro en la ejecución [10], permitiendo una mejora en la comunicación e intercambio de información [11].

En base a ello, se participó con el diseño del propio polígono industrial donde estarían ubicadas las factorías, el entorno de respeto medio-ambiental requerido, y las pautas de suministro

energético y de fluidos, basado en la fiabilidad en la calidad del suministro eléctrico (sistemas redundantes tanto en líneas como en apartamento de media tensión, con sistemas telemandados).

La segunda fase consistió en el propio diseño de las factorías y sus instalaciones con los criterios basados en el apartado anterior, en un entorno de fiabilidad total, mantenibilidad y operación ágil y estructurada, respeto medio-ambiental y máxima eficiencia energética, así como la consideración de los mecanismos para la captación de la información útil y con ello la adecuada gestión del conocimiento.

3.1. EL DISEÑO BASADO EN LA FIABILIDAD

La fiabilidad es el recurso fundamental para maximizar la eficiencia de los equipos productivos e instalaciones y minimizar el número y tipo de fallos que puedan producir el paro en la producción [3].

Se partió, con los criterios siguientes en referencia a la energía eléctrica (con el objeto de aumentar la fiabilidad), que conllevó al desarrollo de los proyectos de distribución eléctrica:

- Suministros redundantes desde la propia subestación, con disponibilidad de potencia hasta 35.000 kW.
- Posibilidad de suministro alternativo desde distintas subestaciones, evaluando el costo y la fiabilidad, con un modelo optimizado optimo a las exigencias del servicio.
- Centros de entrega redundantes en la propia urbanización.
- Sistemas telemandados remotos de control y conmutación de redes, automáticos, para la utilización

ante acciones críticas.

De igual manera dentro de la propia distribución interior de la factoría, algunas de las decisiones importantes para el aumento de dicha fiabilidad en el conjunto de las instalaciones y servicios fueron las siguientes:

a) Aumento de la fiabilidad eléctrica:

Con una potencia instalada superior a los 25000 Kw, la distribución interior está formada por 16 transformadores secos de 1250 kVA cada uno, centralizados en tres centros de transformación independientes, con un diseño basado en los centros de gravedad de las cargas. Algunas de las características generales tomadas son:

- Sistemas redundantes en las instalaciones eléctricas de media tensión (20 kV), tanto a nivel de líneas como transformadores de potencia, como la redundancia en las redes principales de BT (400/230V).
- Sustitución de los cables de potencia de BT por canalizaciones electrificadas prefabricadas (Figura 2), con el fin de reducir la proba-



Figura 2: Detalle sistema de canalización electrificada y transformadores secos

bilidad de fallo por dichos componentes y capacidad de carga en un momento dado.

- Cuadros eléctricos de potencia tipo OKKEN, con interruptores de potencia extraíbles, con el fin de prever de una manera rápida y eficaz, posibles sustituciones sin afectar a la producción.
- Sistemas de alimentación ininterrumpida mediante SAIs dinámicos (volantes de inercia).
- Sistema de monitorizado y control de la distribución eléctrica. Control de las instalaciones de iluminación.

b) Aumento de la fiabilidad térmica, frío industrial y distribución de agua:

Con una potencia térmica instalada para servicio de agua cliente y producción de vapor de 15200 Kw, formada por 4 calderas con regulación de necesidades térmicas (Figura 3), da servicio a las necesidades de agua caliente y vapor para las actividades de producción, con un diseño basado en la optimización energética y necesidades puntuales.

- Sistemas redundantes distribución de agua

Sistemas de impulsión de agua sanitaria, de limpieza, osmotizada, formada por 2 plantas de ósmosis, con control informatizado centralizado, y sistemas con regulador por variador para conseguir presiones constante y alto nivel de eficiencia energética. Además de la redundancia en los sistemas de bombeo, se han ejecutado sistemas anillados en la distribución, con múltiples válvulas de bypass (posibilidad de otras vías de suministro, maniobras y mantenimiento).



Figura 3: Detalle de sala técnica térmica de calderas, diseñada para las correctas funciones de mantenimiento



Figura 1: Implantación de nuevas factorías de Martinez Loriente S.A.

- Sistemas de frío industrial

Sistema combinado de refrigeración industrial mediante compresores de amoníaco y de CO₂, con ciclo de eficiencia energética con recuperación de calor. Con una potencia frigorífica instalada de 17660 kW, formada por 11 compresores con regulación automática de necesidades frigoríficas, da servicio a las necesidades de producción y almacenamiento de cámaras frigoríficas, con un diseño basado en la optimización energética y necesidades puntuales. Con capacidad de reserva para sustituciones, paradas y acciones de mantenimiento.

3.2. EL DISEÑO BASADO EN LA MANTENIBILIDAD

Uno de los pilares básicos de la disponibilidad es la mantenibilidad. Es por ello que fue uno de los criterios fundamentales en el diseño de la planta industrial: conseguir los requerimientos necesarios para un mantenimiento eficiente, ágil, y económico para la máxima disponibilidad operacional.

Las opciones para ello fueron:

- La normalización y homogenización del mayor número de equipos y componentes utilizados en las

instalaciones industriales.

- La aplicación de tácticas de mantenimiento, con técnicas TPM (Mantenimiento productivo total) en los niveles de producción, con la incorporación de mecánicos productivos, hasta los requisitos de un mantenimiento basado en la fiabilidad (RCM) utilizado en los equipos e instalaciones más avanzadas y críticas, con incorporación de técnicas de gestión del conocimiento como elementos de autoaprendizaje y decisión (base de datos con las mejores experiencias de los operarios, las actuaciones realizadas, y los criterios para las diferentes maniobras), para la reducción de tiempos de actuación ante averías (Figura 4).
- El diseño de las salas técnicas, patinillos y posibles zonas de actuación de mantenimiento, con criterios de espacio suficiente, y acceso practicable en cualquier momento, que posibilite con facilidad y agilidad posibles sustituciones y maniobras comunes de mantenimiento. Este aspecto, normalmente olvidado en los diseños, es vital para

la futura operación, rentabilidad en operación y eficiencia en las actividades ante fallos o mantenimientos rutinarios.

3.3. EL DISEÑO BASADO EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS ALTERNATIVAS

Una determinación fundamental de la empresa, fue el diseño basado en la máxima eficiencia energética y el uso de energías alternativas.

De entre los muchos criterios utilizados y ejecutados, se podrían destacar:

- Control centralizado e informatizado de la instalación eléctrica y control instantáneo de consumos generales y locales, con implantación de sistemas de medición en todas las líneas generales en los cuadros diseñados (Figura 5).
- Control informatizado de los sistemas de iluminación de toda la factoría y su sectorización a distancia, y de manera local mediante sectorizaciones parciales (sólo en marcha con tarjeta acceso). Todo el sistema de iluminación interior fluorescente dispone de sistema de regulación de flujo, para mayor optimización en uso y mayor vida operativa de las lámparas.
- Implantación en diseño y ejecución de variadores de velocidad con control electrónico en sistemas de bombeo y distribución de fluidos (Figura 6), con el fin de optimizar la eficiencia energética, regulación fina de presiones y caudales, menor desgaste del equipamiento y por consiguiente reducción de los coste de mantenimiento y aumento de la vida útil.
- En los sistemas de refrigeración industrial (Figura 7), uno de los recursos principales de la factoría, con el fin de aumentar la eficiencia energética y fiabilidad del sistema, se instaló un sistema combinado de refrigeración industrial mediante compresores de amoníaco y de CO₂, con ciclo de eficiencia energética con recuperación de calor. Con la recuperación de calor se consigue aprovechar la descarga de los compresores de amoníaco que es de 70°C y pasarla por un intercambiador de amoníaco/agua, que por seguridad se vuelve a pasar por otro intercambiador agua/



Figura 4: Principios de mantenimiento en las factorías de Martínez Loriente S.A.

agua, consiguiendo que esa energía residual sea aprovechada para que el agua que nos llega de la red de distribución a 15°C se caliente a unos 30°C, este aumento de 15°C, además de conseguir ahorro energético, ayuda a la condensación del amoniaco ahorrando energía en las torres de condensación. Así mismo todos los compresores están dotados de variadores electrónicos de velocidad para optimizar

sus prestaciones y maximizar la eficiencia energética.

- En la apuesta por la utilización de energías alternativas, se procedió al diseño de una instalación fotovoltaica integrada en la zona industrial con potencia dentro de la factoría de 1.200 KW (400 kW en suelo y 800 kW sobre techos) (Figura 8). Esto confiere un aporte fundamental de energía solar, además de conseguir otros aspectos tales como uniformidad en la autonomía de la energía eléctrica suministrada, en concreto estabiliza las caídas de tensión y la calidad de la energía eléctrica proveniente de las subestaciones).

3.4. EL DISEÑO BASADO EN EL RESPETO MEDIO AMBIENTAL

Otros de los principios fundamentales, fue el respeto medio-ambiental, no sólo en lo realmente obligatorio por normativas sectoriales, sino el adoptar las mayores medidas adicionales, que hicieran del proyecto una factoría totalmente respetuosa con el medio-ambiente. Algunas de las medidas adoptadas:

- Conseguir una Autorización Ambiental Integrada del complejo industrial de Martínez Loriente S.A., construyendo una depuradora de última generación, con capacidad de tratamiento de 2000m³/día y una carga de 66.700 habitantes equivalentes (h.e.).



Figura 5: Detalle de sistemas de control y seguimiento en cuadros generales



Figura 6: Detalle de salas fluidos, con sistemas de regulación mediante variadores electrónicos



Figura 7: Detalle de sala técnica de refrigeración industrial, diseñada para las óptimas condiciones de eficiencia energética



Figura 8: Detalle de sistemas fotovoltaicos instalados en suelo y sobre techo



Figura 9: Detalle de lago artificial: misión mejora depuración, ornamental y aprovechamiento para riego



Figura 10: Detalle de depósitos de almacenamiento de aguas pluviales

Para mayor aprovechamiento de las aguas residuales, el agua, una vez depurada en óptimas condiciones, subida mediante unas estaciones de bombeo a un lago artificial ubicado en la zona de entrada al polígono (Fig. 9); esa agua,

además de ejercer una función ornamental, se emplea para el riego de toda la jardinería del complejo industrial.

- Aprovechamiento aguas pluviales, del interior de la factoría, con

autorización de la Confederación Hidrográfica del Júcar. Para ello se construyó una red de recogida de aguas pluviales, habilitándose un pozo de bombeo y tres depósitos de 1000 m³ (Figura 10). Dichos depósitos tienen un sistema de control y ajuste de hipoclorito para mantener el agua en condiciones óptimas. Los usos fundamentales de esa agua son:

1. Producción de agua descalcificada para la refrigeración de los condensadores evaporativos (torres de refrigeración).
 2. Suministro de agua para baldeos y limpieza de exteriores, y riego de la jardinería interior de la parcela.
 3. Limpieza de placas solares.
 4. Abastecimiento de la fuente ornamental existente en la parcela:
- Instalación industrial, libre de baterías para los sistemas de alimentación ininterrumpida, que son del tipo dinámico con volantes de inercia.
 - Todos los transformadores se han considerado de tipo seco, para evitar el tratamiento y toxicidad de los aceites.

3.5. EL DISEÑO BASADO EN LA INFORMACIÓN Y LA GESTIÓN DEL CONOCIMIENTO

La información es vital para la funcionalidad óptima de los servicios de mantenimiento. En instalaciones complejas, se precisa la recolección de datos, con el fin de adecuar los programas de mantenimiento, control y operación de instalaciones y seguimiento de paradas o fallos.

Desde la propia definición del proyecto, en las actividades de mantenimiento se ha hecho una mayor incidencia para la adaptación de los procesos de gestión del conocimiento, propiciando la generación, la codificación, la transferencia y la utilización del conocimiento. Dicha actividad táctica puede considerarse bajo un enfoque kantiano donde interactúan personas, instalaciones y entorno (Figura 11) y todas las variables en conjunto tienen que ser examinadas.

Fundamental será captación adecuada de información, para un posterior procesamiento y tratamiento, generador del conocimiento propio en la organi-

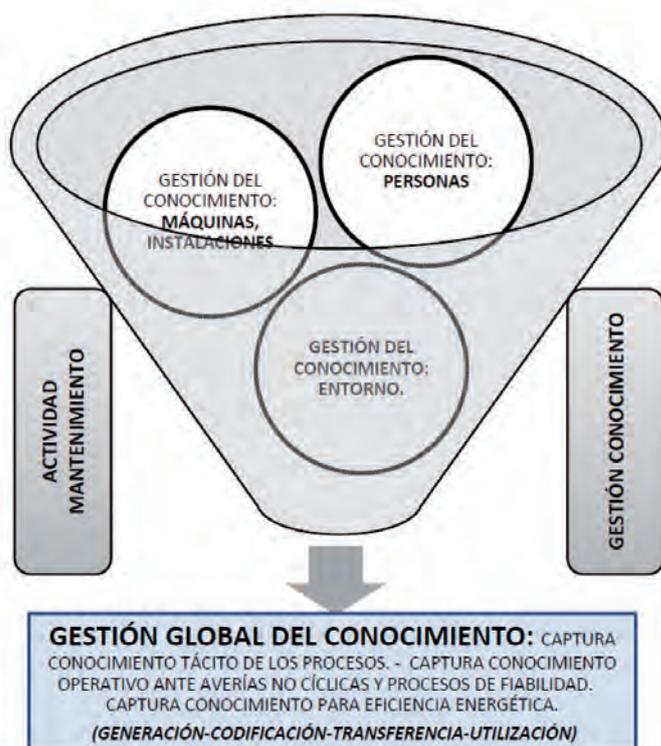


Figura 11: Enfoque kantiano de la actividad de mantenimiento

zación y herramienta fundamental de mantenimiento, integrando la información útil y estratégica del servicio, mejorando la cadena del servicio a prestar.

Se ha desarrollado e implementado un modelo de gestión del conocimiento para actividad de mantenimiento, con la captación del conocimiento tácito estratégico de los técnicos y operarios [12], así como la recolección y gestión de información técnica de instalaciones y equipamiento, para el control, visualización, obtención de datos operativos y registro de fallos.

Todo ello permite tener controlado los parámetros fundamentales de instalaciones y equipos, que optimizan el control de la fiabilidad de las instalaciones, la previsión de los programas de mantenimiento, así como un control y optimización de la eficiencia energética, demostrando que la aplicación de modelos de gestión del conocimiento dentro de los departamento de mantenimiento de la empresa permite optimizar los procesos y mejorar la disponibilidad del servicio y mejores resultados económicos para la empresa.

Aunque según las encuestas sectoriales [13], los servicios técnicos de mantenimiento de la mayoría de las empresas, dedican poca inversión al conocimiento y desarrollo de dicha actividad, en el caso de Martínez Lorient S.A., se ha realizado una apuesta con un compromiso con la investigación y desarrollo en las áreas técnicas de mantenimiento, firmando un convenio con la Universidad Politécnica de Valencia para el desarrollo y mejora de los servicios de explotación y mantenimiento, buscando de esta manera, una profundización y mejora en dichas actividades.

4. CONCLUSIONES

Se han descrito los principios generales de instalación de una nueva planta industrial, donde decisiones y consideraciones tomadas en un primer momento por la concienciación y decisión de una dirección general, con criterios de calidad, eficiencia y miras a medio plazo, han conseguido una implantación industrial que marca un referente en la industria alimentaria.

Partiendo de unos principios fundamentales que buscan la máxima eficiencia (con un diseño basado en fiabilidad,

mantenibilidad, eficiencia energética y energías alternativas, respeto medio ambiental y diseño basado en la información y gestión del conocimiento), se ha conseguido, una industria, que cumpliendo todas las expectativas de producción -requisito fundamental en cualquier planta industrial - ha ido un paso más, respetando las condiciones de mantenibilidad eficaz en el futuro, junto con un respeto ecológico.

La sinergia con los órganos intervinientes en la ejecución de la planta industrial unido a la determinación y al compromiso de la dirección de ingeniería de la propia empresa, han sido determinantes para conseguir, a un nivel de inversión y costes adecuados, conseguir una planta con capacidad de mejora y rentabilidad económica, control de la información y el conocimiento, para las funciones futuras de explotación y mantenimiento que se deben cumplir.

La empresa industrial tratada en el presente caso ha recibido numerosos premios a la excelencia, destacando el reconocimiento a la excelencia a la mejor industria española y segunda europea, durante el año 2009.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente artículo, quieren mostrar su agradecimiento al editor y los revisores anónimos del presente artículo, por sus excelentes recomendaciones y consideraciones, que sin duda han ayudado a sintetizar y mejorar la exposición de una manera sustancial.

PARA SABER MÁS

[1] González, F.J. "Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado". Fundación confemetal. Madrid. 2005

[2] Tavares L. "Administración moderna de Mantenimiento". Editorial Interamericana S.A. 2004

[3] Sols, A. "Fiabilidad, Mantenibilidad, Efectividad, un enfoque sistémico". Comillas. 2000. Madrid.

[4] Corral A., Isusi, I., Peinado E. y Pérez, T. "La responsabilidad Social y medio ambiental en la empresa Latinoamericana". México: Banco Internacional de Desarrollo. 2007

[5] Amorós, E. "Diseño del lugar de trabajo". Lima: USAT. 2003

[6] Ogaji, S.; Sampath, S.; Singh, R.; Probert, D. "Novel approach for improving power-plant availability using advanced engine diagnostics". *Applied Energy* 72 (2002). pp. 389-407. [http://dx.doi.org/10.1016/S0306-2619\(02\)00018-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0306-2619(02)00018-1)

[7] Sule, D. "Instalaciones de manufactura: Ubicación, planeación y diseño". México: Thomson Learning. 2001

[8] Arnoletto, E. "Administración de la producción como ventaja competitiva". Argentina: Eumed. 2007

[9] Alcázar, M; Álvarez, C.; Escrivá, G.; Domijan, A. "Evaluation and assessment of demand response potential applied to the meat industry". *Applied Energy* 92 (2012). pp 84-91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.10.040>

[10] Whipple, J.; Russell, D. "Building supply chain collaboration: a typology of collaborative approaches". *The International Journal of Logistics Management*. (2007). Vol. 18 No. 2, pp. 174-96. DOI: 10.1108/09574090710816922

[11] Carr, A.; Kaynak, H. "Communication methods, information sharing, supplier development and performance: an empirical study of their relationships". *International Journal of Operations & Production Management*. (2007). Vol. 27 No. 4, pp. 346-70. DOI: 10.1108/01443570710736958

[12] Cárcel, F.J; Roldán, C.. "Principios básicos de la Gestión del Conocimiento y su aplicación a la empresa industrial en sus actividades tácticas de mantenimiento y explotación operativa: Un estudio cualitativo". *Intangible capital*. (2013), 9 (1):91-125. <http://dx.doi.org/10.3926/ic.341>.

[13] AEM, Asociación española de mantenimiento. "Encuesta sobre la evolución y situación del mantenimiento en España". AEM, 2010.

Análisis comparativo y justificativo para el cambio a leds en instalaciones con lamparas de halogenuro metálico.

Un paso más hacia la eficiencia energética en iluminación urbana

Manuel Jesús Hermoso-Orzáez de la Universidad de Jaen y José Ramón de Andrés-Díaz de la Universidad de Málaga

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5803>

1. INTRODUCCIÓN

El Alumbrado Público supone el 2,3% en el consumo eléctrico mundial [1], y hasta el 80% de la energía eléctrica municipal consumida [2] [3] [4]. Es por ello que en la actualidad son numerosos los estudios y análisis orientados a mejorar la eficiencia y el ahorro energético de los sistemas de iluminación [8].

Desde hace algún tiempo parecía que iba a ser posible sustituir lámparas de descarga tradicionales de halogenuros metálicos (en adelante HM), por luminarias con tecnología LED con prestaciones lumínicas semejantes [5]; de hecho se estimaban ahorros del consumo eléctrico entre el 20 y 40% con amortizaciones en torno a los 4 años [6] [7].

La iluminación urbana con LEDs, es ya una realidad que poco a poco tiende a imponerse en nuestras ciudades [9]. Aunque aún no parece recomendable realizar sustituciones masivas, debido a su elevado coste, la tendencia de los precios a la baja y la mejora en su eficiencia en los últimos años permite pensar, que a corto o medio plazo, puedan ser totalmente competitivas en términos de rentabilidad económica y prestaciones [11] [12].

Una de las grandes ventajas de los LEDs, además de su eficiencia y vida útil, es la direccionalidad. Las fuentes

de luz tradicionales, que emiten en muchas direcciones, necesitan utilizar reflectores, difusores, lamas, etc. para su correcta orientación. En definitiva elementos auxiliares que siempre disminuyen el rendimiento del punto de luz, aprovechando solo parcialmente el flujo de la fuente de luz. En cambio los LEDs, al ser direccionales, tienen la ventaja de que todo su flujo de luz, sin apenas pérdidas llega al elemento que se quiere iluminar.

Este estudio de un caso real a un año, pretende analizar y exponer los resultados (lumínicos, eléctricos, energéticos y económicos) de sustituir 45 luminarias HM, por el mismo número de luminarias con tecnología LED.

2. MATERIALES, EQUIPOS DE MEDICIÓN Y METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

2.1. CARACTERÍSTICAS, NÚMERO Y DISPOSICIÓN DE LAS LÁMPARAS ANALIZADAS

Para el estudio se ha seleccionado un vial residencial, en la localidad de Fuengirola (Málaga), con un ancho total de 12 m, (calzada de 6 m, y aceras de 3 m). De acuerdo con el Reglamento de Eficiencia Energética R.D 1890/2008 ITC-EA-02, dicho vial se ha clasificado como calle residencial suburbana con aceras para peatones y velocidad limitada (D3) y clase de alumbrado normal (S3).

Existían 45 farolas de 3,5 m de altura, equipadas con lámparas de HM de 150 W CDO TT/828, (Fig.1). Posteriormente, y tras estudio luminotécnico justificativo que se presenta más adelante, se sustituyeron por otras 45 luminarias de 51 W equipadas con LEDs ETI-LED60 NP (Fig.2) (Tabla.1)

Como pueden verse en las Figuras anteriores, existe gran similitud en la fotometría de las luminarias, aunque la de la luminaria LED, debido a su direccionalidad, aprovecha mejor el flujo luminoso emitido.

La fuente de alimentación para los LEDs serán del tipo LDAC-1500 I-75 con las siguientes características: (ver Tabla 2).



Fig.1: Luminaria ATP mod Villa lámpara HM -150 W. Fuente: Catalogo ATP



Fig.2: Luminaria ATP modelo Villa y con fuente de luz LED 51 W. Fuente: Catalogo ATP

Tipo lámpara HM	Marca	Potencia (W)	Tº Color (ºK)	Flujo Luminoso (Lm)	Eficacia lumiosa (Lm/W)	Vida Util (h)
MASTER CITY CDO-TT/828	PHILIPS	150	2.800	13.500	90	15.000
ETILED	ETI S.A	51	4.000	4.059	80	50.000

Tabla 1: Características de las fuentes de luz. Fuente: Catálogos PHILIPS y ETI

LDAC-1500 I-75	
Tension nominal:	110-240 Vac
Factor de potencia:	> 0,95
Corriente de salida:	1200 mA
Potencia máxima	75 W
Corriente de arranque:	45 A (230 Vac)
Frecuencia	50 Hz
Potencia Nominal	51 W
Rango de tensión	90-295 Vac
Corriente de fuga:	<0,75 mA (240 Vac)
Corriente de arranque:	45 A (230 Vac)

Tabla 2: Características de la fuente de alimentación de los LEDs. Fuente: ETI

Las lámparas de HM cuentan con equipo completo con reactancia, arrancador y condensador de corrección de f.d.p modelo VSI 15/22-3AF-150 de la marca ELT S.L.

2.2. CÁLCULOS LUMINOTÉCNICOS TEÓRICOS DE PARTIDA

Como se ha indicado antes, y previamente a la selección de los equipos de sustitución, se realizó estudio lumínico teórico para lámparas HM y LED (fig. 3 y 4), usando programa de Calculo Luminotécnico SIBA, elaborado para ATP por el Laboratorio de Luminotecnia de la Universidad Politécnica de Cataluña.

Como puede verse por los valores obtenidos, teóricamente, las calidades de iluminación van a mantenerse a pesar de haber cambiado a una tecnología que nos va a permitir reducir el consumo en más de un 60%. Con ambas disposiciones cumple conforme a la Tabla 8 de ITC-EA-2 del Reglamento de Eficiencia Energética R.D 1890/2008. Para una situación de proyecto D3 y clase de alumbrado S3 tiene valores equivalentes a los valores de iluminancia media 7,5 lux e iluminancia mínima 1,5 lux recogidos en dicha tabla.

2.3. METODOLOGÍA Y EQUIPOS DE MEDIDA

Siguiendo las recomendaciones de estudios similares [13] [14] [15] la metodología consistió en:

1. Recopilar datos de los parámetros eléctricos registrados diariamente, durante un año, con el equipo de medida TELEASTRO fabricado por AFEISA, instalado en cabecera, contrastando estos resultados con el analizador de red tipo AR6 de CIRCUTOR.
2. Realizar mediciones luminotécnicas con el luxómetro marca GOSSSEN modelo MAVOLUX 5032C/B del Área de Proyectos de Ingeniería de la Escuela de Ingenieros de la Universidad de Málaga [10].

Estos datos nos servirán para estudiar en su conjunto, contrastar resulta-

dos y realizar un análisis comparativo, para las 45 luminarias, antes y después de de la sustitución de las lámparas de descarga HM por las lámparas LEDs. De esta forma podremos evaluar las minoraciones en el consumo y contrastar, comparativamente, los resultados al realizar la sustitución.

2.3.1. Equipos para la medida de los parámetros eléctricos

Los equipos utilizados para las medidas de los diferentes parámetros eléctricos son:

1. Equipo de medida TELEASTRO cuyas características y rango de medidas, se indican a continuación (Tabla 3).
2. Equipo de medida analizador de red tipo AR6 cuyas característica, se indican a continuación. (Tablas 4 y 5).

	Iluminancias (20 m interdistancia) (Lux)
Máxima	34,7
Media	12,2
Mínima	3,8
Umed	0.31
Uext	0.11

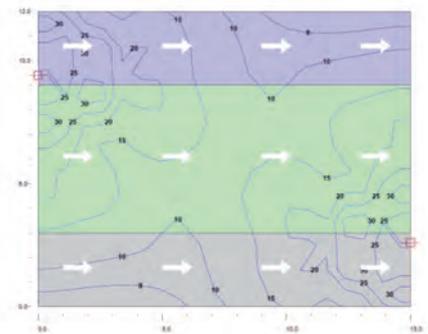


Fig. 3: Iluminancias y Curvas Isolux. Lámpara HM 150W. Fuente: Elaboración propia

	Iluminancias 20 m de interdistancia) (Lux)
Máxima	28,6
Media	10,6
Mínima	1,4
Umed	0.13
Uext	0.05

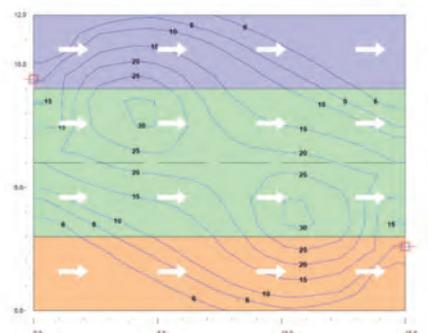


Fig. 4: Iluminancias y Curvas Isolux LED 51W. Fuente: Elaboración propia

2.3.2. Equipos para la medida de los parámetros luminotécnicos

Se empleó un luxómetro con las características que se recogen en la Tabla 6.

3. RESULTADOS

3.1. BALANCE Y RESULTADOS DEL ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS DURANTE 12 MESES

3.1.1. Resultados medios obtenidos con equipo TELEASTRO

Los resultados medios comparativos registrados con el TELEASTRO durante 12 meses se recogen en la Tabla 7.

Las diferencias de potencia entre las líneas se deben a que la asignación de puntos de luz por fase no es exactamente igual, ya que en la práctica esta asignación viene condicionada por la forma y distribución de la calle. En nuestro caso, la fase L1 tiene conectadas 16 puntos de luz, la L2 tiene 12, y la L3 tiene 17.

Como podemos ver en la Tabla 7, las reducciones de potencia obtenidos son superiores al 60%, un valor que, como veremos más adelante, es muy elevado y por tanto va a permitir una recuperación de la inversión en poco tiempo de la nueva instalación.

3.1.2. Resultados de contraste obtenidos con equipo analizador de red AR6 para las 45 luminarias LEDS.

Con el equipo analizador de red AR6 se realizaron mediciones de los parámetros eléctricos por fase para comprobar la calidad de los datos tomados con el equipo de AFEISA.

Al contrastar con el equipo AR6 las medidas del TELEASTRO, se observan coincidentes en general. Aquí es de destacar la aparición de armónicos debidos a los equipos electrónicos de los LEDS.

3.2. BALANCE LUMINOTÉCNICO

El método seleccionado para las mediciones luminotécnicas, ha sido el

método simplificado, denominado de los “nueve puntos”, descrito en la *R.D. 1890/2008*, ITC-EA-07.

El balance luminotécnico se recoge en la *Tabla 9*.

Como vemos los valores obtenidos analíticamente con el programa de cálculo luminotécnico SIBA son semejantes, a los obtenidos mediante la medición en

campo, lo que nos da fiabilidad a la hora de planificar futuras sustituciones. En la medición real también se cumplen los parámetros exigidos para nuestro tipo de vial y clase de alumbrado.

En las Figuras 5 y 6. se realiza una evaluación de la temperatura de color, mediante fotografía en la que se ha forzado el balance de blancos. Se

Transformadores de intensidad:		
Tipo Toroidal con núcleo cerrado		
Relación xA / 1,5 VAC		
Clase 2		

REGISTRO	UNIDADES	RANGO
VL	Voltios x 10	0...3000
PL	Wattios	0...65535
MA0	----	F_ESCALA_MAO..F_ESCALA_MAO
IL	Amperios x 10	0...F_ESCALA_I x 10 ^{*(1)}
QL	VAR	0...65535
PFL	----	-1...1
P_ACTIVIA_III	Wattios	0...196605
P_REACTIVA_III	VAR	0...196605
CNT_ACTIVIA	kWh x 10	0...4294967295
CNT_REACTIVA	kVARh x 10	0...4294967295

Tabla 3: Características, precisión y unidades y rangos de los registros de medida. Fuente: AFEISA

AR6	
Clase 0,5 en la medida	
Class B según UNE-EN 61000-4-30	
Medida y registro según EN 50160	

AR6	
Tensión nominal : 12 Vdc	
Corriente : 2 A	
Potencia máxima : 24 W	
Consumo : 30 VA	
Temperatura de funcionamiento : 0...50 °C	
Altitud : 2000 m	
Humedad sin condensación : 5...95 %	
Grado de contaminación : 2	

Tabla 4: Características técnicas generales del analizador AR6 (Fuente: CIRCUTOR)

Características entradas de tensión	Características entradas de corriente	Clase de precisión
Entradas de tensión U1, U2, U3, UN, Tierra,	Entradas de corriente I1, I2, I3, IN, Ifuga,	Tensión 0,5% ·+- 2 dígitos
Tensión de entrada 10...800 Vrms fase-neutro	Tensión de entrada 0...2 V	Corriente 0,5% ·+- 2 dígitos
Máxima tensión admisible 2.500 Vpic	Margen de medida 1...120 de In %	Potencia Activa 0,5% ·+-2 dígitos
Ancho de banda 3,2 kHz	Intensidad máxima 3 In A	Potencia Reactiva 1% ·+- 2 dígitos
	Impedancia de entrada 10 k_	

Tabla 5: Características técnicas y precisión del Analizador AR6. Fuente: CIRCUTOR

Especificaciones técnicas Luxómetro GOSSEN modelo MAVOLUX 5032C/B	
Modelo de luxómetro	5032C
Rangos (I...IV)	0,1...199,9 lx 1...1.999 lx 10...19.990 lx 100...199.900 lx
Resolución (I...IV)	0,1 lx 1 lx 10 lx 100 lx
Precisión	±3 % del valor de medición + 4 dígitos para luz de bombilla (luz normalizada clase A)
Cuota de medición	2,5 mediciones / segundo
Sensor de luz	Fotodiodo de silicio con filtro V (I) corresponde a la clase de precisión DIN 5032 apartado 7 clase C
Funciones	Data-Hold, Max-Hold y control de batería Auto-Power-Off a los 2 min no operativo

Tabla 6: Características técnicas y precisión Luxómetro MAVOLUX 5032C/B. Fuente: GOSSEN

PARAMETROS 45 LAMPARAS HM 150 W						PARAMETROS 45 LAMPARAS LEDS 51 W				
(Mediciones en cabecera del cuadro)						(Mediciones en cabecera del cuadro)				
FASES	Intensidad	Tensión	Potencia Activa	Potencia Reactiva	Factor de Potencia	Intensidad (A)	Tensión (V)	Potencia Activa (Kw)	Potencia Reactiva (Kva)	Factor de Potencia
	(A)	(V)	(Kw)	(Kva)						
L1	9,7	235	2,140	0,687	0,92	3,5	236	0,830	0	-0,98
L2	8,0	236	1,810	0,357	0,94	2,7	237	0,639	0	-0,99
L3	10,0	234	2,280	0,220	0,95	3,9	235	0,889	0	-0,98

% de reducción al pasar de Halogenuros Metálicos a LEDs		
FASES	Potencia Act	Potencia React
	(Kw)	(Kva)
L1	61,21%	100,00%
L2	64,70%	100,00%
L3	61,01%	100,00%

Tabla 7: Resultados de las mediciones eléctricas y % de reducción. Fuente: Elaboración propia

observa que las temperaturas de color son distintas con las lámparas de HM de 150 W, blanco cálido, frente al color blanco frío de los LEDs [16] [17]. Esto puede entenderse porque, en general, los LEDs fríos tienen un mayor rendimiento lm/W que los LEDs cálidos. Los residentes en la zona en la que se ha producido la sustitución no han manifestado (después de un año) ninguna incomodidad por el cambio de temperatura de color, por lo que lo admitimos como válido.

4. BALANCE ENERGETICO COMPARATIVO Y JUSTIFICACIÓN DE LA INVERSIÓN. ESTUDIO DE AMORTIZACIONES Y RENTABILIDAD

Para el análisis del balance energético y económico, así como para la justificación de la inversión consideraremos que la sustitución de las 45 lámparas de HM por LEDs suponen unos costes aproximados de inversión de 13.500 Euros (45 luminarias x 300 Euros / luminaria = 13.500 Euros)¹.



Fig. 5: Fotografía del vial y detalle de lámpara LED de 51 W



Fig. 6: Fotografía del vial y detalle de lámpara de HM de 150 W. Fuente: elaboración propia

¹ La justificación del desglose descompuesto para la sustitución de equipos sería:

219€ Material equipo LED 51 W

036€ Mano de obra oficial peón electricista 1 h

045€ Camión grúa con canasta 1 h

Total 300€/luminaria

RESULTADOS DE MEDICIONES DE CONTRASTE PARA LOS 45 LEDS CON ANALIZADOR DE RED AR6			
	L1	L2	L3
Tensión de Fase-Vf (V)	241,02	239,60	239,25
Intensidad por fase-I(A)	11,28	10,63	11,31
Potencia Activa por fase (Kw)	0,9	0,7	0,9
Potencia Reactiva Inductiva (KVARL)	0	0	0
Potencia Reactiva Capacitiva (KVAc)	0,1	0,0	0,2
Potencia Aparente (KVA)	1,8	1,5	1,8
Factor de Potencia (cos f)	1	1	-0,98
ARMÓNICOS DE CORRIENTE			
	L1	L2	L3
Armónicos Fundamentales- THDV (%)	17,412	12,952	17,282
Armónicos de orden Par -THDV par (%)	0	0	0
Armónicos de orden Impar -THDV impar (%)	3,28	3,45	3,38

Tabla 8: Resultados obtenidos con el analizador de red AR6. Fuente: Elaboración propia

	BALANCE LUMINOTECNICO CALLE SAN PABLO. Método de los Nueve puntos conforme REAL DECRETO 1890/2008, de 14 de noviembre ITC-EA-07				
	LAMPARA DE HM 150 W		LAMPARA LEDs 51 W		VARIACIÓN REAL %
	CALCULOS TEORICOS	MEDICIÓN REAL IN SITU	CALCULOS TEORICOS	MEDICIÓN REAL IN SITU	
Iluminancia media (lux) -Em	12,2	12,18	10,6	11,12	+ 8,70 % (+0.1,06)
Uniformidad media- Um	0,31	0,48	0,13	0,35	+27,08 % (+0.13)
Uniformidad extrema- Ug	0,11	0,28	0,05	0,15	+46.4% (+0.13)

Tabla 9: Balance luminotécnico realizado con luxómetro GOSSEN. Fuente: elaboración propia

Realizaremos el estudio comparativo para un uso diario estimado de 12 horas de media diaria de funcionamiento anual (tablas 10 y 11) [8]. Para este estudio comparativo tomaremos como valor de la energía el que actualmente está pagando el Ayuntamiento para el alumbrado público.

Vemos que la rentabilidad de la inversión es clara. Se obtiene un Pay-Back simple a 3'67, un Tasa Interna de Rentabilidad a 5 años del 15'86% y un Índice Beneficio Coste a 5 años de 1'33. Se ha tomado como referencia el precio de compra del KW.h por el Ayuntamiento a la empresa comercializadora.

5. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Con este estudio queda demostrado, que la tecnología LED, a día de hoy, se encuentra ya lo suficientemente madura para su implantación progresiva en

iluminación urbana, alcanzando unos niveles calidad lumínica y prestaciones de ahorro energético lo suficientemente buenas como para poder competir con las lámparas de descarga, y en particular con las que utilizan HM.

Ha quedado demostrado que con la sustitución de las lámparas HM por lámparas LEDs se consiguen ahorros en el consumo, para el mismo número de horas de funcionamiento, porcentualmente iguales a la reducción de potencia que consigamos con la lámpara sustituta tipo LED. También se ha registrado un consumo prácticamente nulo de la energía reactiva para los LEDs. No obstante, sí hay que hacer notar que se ha registrado un incremento en la contaminación por armónicos en torno al 4% al instalar LEDs. Esta contaminación puede provocar deformaciones significativas en la modulación de la forma onda de la intensidad, y aconseja precaución a la hora de estimar la corriente que cir-

cula por el neutro de la instalación.

El balance luminotécnico es muy semejante, si bien es verdad que las uniformidades media y extrema son ligeramente inferiores. De la evaluación de la Temperatura de Color se observa una tendencia hacia una luz blanca fría para el caso de los LEDs más eficientes, frente a la más cálida para lámparas de HM.

Del análisis rentabilidad de la inversión realizada en este estudio, ha quedado comprobado que, a día de hoy, la inversión necesaria para la sustitución se hace viable para niveles medios de funcionamiento en torno a las 40000 horas anuales.

También es de destacar, desde el punto de vista de la fiabilidad, que después de un año y medio no se han registrado fallos en los equipos LEDs instalados.

Con este estudio ha quedado demostrado el alto potencial de ahorro ener-

Días de funcionamiento anual:	Horas diarias (Media anual)	Coste Euros/Kw-h	Periodo de Análisis (Años)	Consumo Anual HM 150 W	Consumo Anual LED 51 W	Inflacion Media Anual	Incremento Energético Anual
365	12	0,16	5	33.113 Kw-h	11.176,3 Kw-h	3 %	3%
INSTALACIÓN 45 EQUIPOS HM 150 W				INSTALACIÓN 45 KITS ETILED 51 W			
Potencia Lámpara HM		150 W		Potencia Lámpara MÓDULO LED		51 W	
Datos Equipos				Datos Equipos			
n° Luminarias:		45	unidades	n° Luminarias:		45	unidades
Potencia Unitaria		150	W	Potencia Unitaria		46	W
Potencia Consumida (Lámpara + Equipo)		168	W	Potencia Consumida (Módulo + Driver)		52	W
Horario				Horario			
Nivel Pleno		12	horas	Nivel Pleno		12,0	horas
Días Año		365	días	Días Año		365	días
Costes de Consumo				Costes de Consumo			
Media Energía Consumida diaria		90,720	kWh	Energía Consumida diaria		30,62	kWh
Energía Consumida Anual		33.113	kWh	Energía Consumida Anual		11.176,3	kWh
Coste Energía		0,16	€/kWh	Coste Energía		0,16	€/kWh
Coste Energético Anual		5.298,05	€ / año	Coste Energético Anual		1.788,20	€ / año
Costes de Operación				Costes de Operación			
Vida Útil Fuente de Luz		15.000	horas	Vida Útil Fuente de Luz		50.000	horas
Horas Utilización/Año		4.380	horas	Horas Utilización/Año		4.380	horas
Tiempo Reposición		3,42	Años	Tiempo Reposición		11,42	Años
Costes Reposición Lámpara		30,00	€ / año	Costes Reposición Lámpara		0	€ / año
Costes de Mantenimiento		394,20	€ / año	Costes de Mantenimiento		0,00	€ / año
INSTALACIÓN EQUIPOS HM 150 W				INSTALACIÓN 45 KITS ETILED 51 W			
COSTES ANUALES TOTALES		5.692,25		COSTES ANUALES		1.788,20	
BALANCE ENERGÉTICO ANUAL							
Ahorro Anual				21.937		kWh	
ESTANDAR HM 150 W vs ETILED 51 W				21,93		MWh	
Ahorro Anual				3.904,05		€	
Toneladas de CO ₂ evitables				8,57		t/año	
BALANCE ENERGÉTICO A CINCO AÑOS							
	INSTALACIÓN EQUIPOS ESTÁNDAR HM 150 W			INSTALACIÓN 45 KITS ETILED DIM			
	45 LUMINARIAS HM 150 W			45 LUMINARIAS LED 51 W			
Año	Coste Energético	Coste Mantenimiento	Costes Totales	Coste Energético	Coste Mantenimiento	Costes Totales	AHORRO
1	5.298,05 €	394,20 €	5.692,25 €	1.788,20 €	0,00 €	1.788,20 €	3.904,05 €
2	5.456,99 €	406,03 €	5.863,02 €	1.841,84 €	0,00 €	1.841,84 €	4.021,18 €
3	5.620,70 €	418,21 €	6.038,91 €	1.897,01 €	0,00 €	1.897,01 €	4.141,90 €
4	5.789,32 €	430,75 €	6.220,07 €	1.954,00 €	0,00 €	1.954,00 €	4.266,07 €
5	5.963,00 €	443,68 €	6.406,68 €	2.012,62 €	0,00 €	2.012,62 €	4.394,06 €
TOTAL	28.128,06 €	2.092,86 €	30.220,92 €	9.493,67 €	0,00 €	9.493,67 €	20.727,26 €

Tabla 10: Balance energético y económico comparativo a 5 años. Fuente: elaboración propia

gético de los LEDs. No obstante estos equipos deben aún mejorar su precio

de mercado a la baja, para aumentar su rentabilidad, acortando los plazos de

amortización y haciendo más atractiva la inversión.

ANÁLISIS DE LA RENTABILIDAD DE LA INVERSIÓN Y AMORTIZACIÓN PARA EL CAMBIO DE 45 LAMPARAS DE HM DE 150 W A LEDS DE 51 W						
COSTE DE LA INVERSIÓN	13.500 €	AÑOS				
COSTE DEL CAPITAL (i)	5%	1	2	3	4	5
	Cuasi Rentas Anuales (Q)	3.904,05	4.021,18	4.141,90	4.266,07	4.394,06
CALCULAMOS EL VAN para un interés del i = 5 %	Años	1	2	3	4	5
Indice actualizado	$(1+i)^n$	1,05	1,10	1,16	1,22	1,28
Cuasirentas Anuales (Q) afectadas por (i)	$Q/(1+i)^n$	3.718	3.647	3.578	3.510	3.443
Sumatorio Quasirentas Anuales	$\sum Q/(1+i)^n$	- 9.782	-6.135	-2.557	953	4.395,97
VAN a 5 años	4.395,97					
Plazo de Recuperación simple	4					
Plazo de Recuperación	3,67					
Tasa Interna de Rentabilidad (T.I.R)	15,86 %					
Indice Beneficio Coste (IBC)	1,33					

Tabla 11: Análisis de la rentabilidad de la Inversión y Amortización afectada por el coste del dinero (para un tipo de interés del 5%). Fuente: elaboración propia

AGRADECIMIENTOS

Expresar mi agradecimiento al Servicio Técnico de Alumbrado del Ayuntamiento de Fuengirola.

PARA SABER MÁS

- [1] Kostic M, Djokic L. 2009. "Recommendations for energy efficient and visually acceptable street lighting". *Energy*. August 2009. Vol. 34 num.10 p.1565-1572. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.056>)
- [2] Agencia Andaluza de la Energía. 2011. *Guía de ahorro y eficiencia energética en municipios*.; Sevilla SE-232-2011. www.agenciaandaluzadelaenergia.es
- [3] Saunders H.D, Tsao J.Y. 2012. "Rebound effects for lighting". *Energy Policy*. October 2012. Vol 49 p.477-478 (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.06.050>)
- [4] Atkinson B. A, McMahon J. E, Nadel M. 1993 "A review of U.S. and Canadian lighting programs for the residential, commercial, and industrial sectors". *Energy*. February 1993. Vol. 18 No. 2 p.145-158. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0360-5442\(93\)90098-X](http://dx.doi.org/10.1016/0360-5442(93)90098-X))
- [5] Mills E, Piette M. A. 1993 "Advanced energy-efficient lighting systems: progress and potential". *Energy*. 1993. Vol. 18 No.2. p.75-97.(doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0360-5442\(93\)90092-R](http://dx.doi.org/10.1016/0360-5442(93)90092-R))
- [6] Mahapatra S, Chanakya H.N, Dasappa S. 2009 "Evaluation of various energy devices for domestic lighting in India: Technology, economics and CO2 emissions", *Energy for Sustainable Development*. December 2009. Vol 13. Issue 4. p.271-279, ISSN 0973-0826. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2009.10.005>)
- [7] Radulovic D, Skok S, Kirincic V. 2011. "Energy efficiency public lighting management in the cities". *Energy*. April 2011. Vol. 36 No.4 p.1908 -1915.(doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.10.016>)
- [8] Hermoso Orzáez MJ, de Andrés Díaz JR. 2013. "Comparative study of energy-efficiency and conservation systems for ceramic metal-halide discharge lamps", *Energy*. 2013. Available online 7 March 2013 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.050>)
- [9] Rea M.S. 2010. "The future of LED lighting: Greater benefit or just lower cost". *Lighting Research and Technology*. 2010. Vol.42 p.370. (doi: <http://dx.doi.org/10.1177/1477153510390978>)
- [10] CIE Report 194:2011. "On site Measurement of the Photometric Properties of the road and Tunnel Lighting". ISBN 978 3 901906 92 3
- [11] Zalewski S. 2012. "A proposed method for the calculation of light emitting diode road lighting". *Lighting Research and Technology*. June 2012. Vol.44 2 p.186-196.(doi: <http://dx.doi.org/10.1177/1477153511423881>)
- [12] Svilainis L. 2008. "LED directivity measurement in situ", *Measurement*. July 2008. Vol 41 Issue 6 p. 647-654. ISSN 0263-2241. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2007.09.003>)
- [13] Gil-de-Castro A, Moreno Muñoz A, Larsson A, et al. 2012. "LED Street lighting: A power quality comparison among street light technologies". *Lighting Research and Technology*, 2012. Vol.0. p.1-19. 1 (doi: <http://dx.doi.org/10.1177/1477153512450866>)
- [14] Wen-Shing S, Cih-Hsuan T, Yi-Han H, 2011. "Simulating the Illuminance and Efficiency of the LEDs Used in General Household Lighting", *Physics Procedia*. 2011. Vol. 9 p.244-248. ISSN 1875-3892. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2011.06.156>)
- [15] Villanueva I, Lázaro I, Anzures J. 2012. "Reliability analysis of LED-based electronic devices". *Procedia Engineering*. 2012. Vol.35 p. 260 - 269. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.04.189>)
- [16] Pousset N, Rougié B, Razet. A. 2010. "Impact of current supply on LED colour ". *Lighting Research and Technology*. Dec 2010. Vol. 42, 4 p.371-383. (doi: <http://dx.doi.org/10.1177/14771535103733159>)
- [17] CIE Report no 115:1995. Recommendations to illuminate roads for motorized vehicles and pedestrian transit.

Tratamientos termoquímicos para aceros maraging: nitruración por plasma asistido por arco catódico

Jonathan Fernández de Ara, Eluxka Almandoz, Gonzalo G Fuentes y José Antonio García AIN_tech, Centro de Ingeniería Avanzada de Superficies (Navarra)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5848>

1. INTRODUCCIÓN

Los aceros *maraging* son aleaciones Fe-Ni, con concentraciones de Ni de entre 15-25% en peso, y con concentraciones de carbono muy bajas (<0.03%). Estos aceros pueden contener otros aleantes como Cromo, Titanio, Níquel, Molibdeno, Cobalto o Aluminio. El principal interés tecnológico de este tipo de aceros radica en sus propiedades de dureza (45-50HRC, y hasta 600HV) y alta tenacidad que se logran a partir de un tratamiento de transformación martensítica y posterior envejecimiento (*aging*). Esta combinación *martensite + aging*, da nombre a este tipo de aceros.

Las propiedades de estos aceros se originan gracias a un complejo mecanismo de formación y precipitación de compuestos intermetálicos, a través de un proceso de envejecido (*aging*), que consiste en un tratamiento isoterma del material, en condiciones no oxidantes, a temperaturas/tiempos cuyo rango oscila entre los 450-550°C y 1-4 horas. Su potencial de aplicación es enorme, siempre y cuando se desarrollen tratamientos de superficie que mejoren ostensiblemente sus propiedades anti-desgaste y de resistencia a la corrosión.

Los tratamientos termoquímicos de nitruración son una alternativa viable para dotar a estos aceros de las propiedades de dureza superficial, resistencia al desgaste abrasivo y resultan necesarios para mejorar sus prestaciones. No obstante, los tratamientos de nitruración convencionales como la nitruración gaseosa o en sales fundidas requieren tiempos prolongados de aplicación, lo cual puede dar lugar a un proceso termodinámico de sobre-envejecimiento. Este mecanismo se da cuando nuclea la

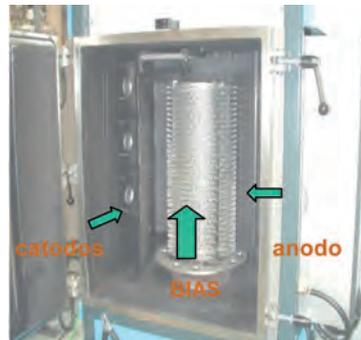


Fig. 1a

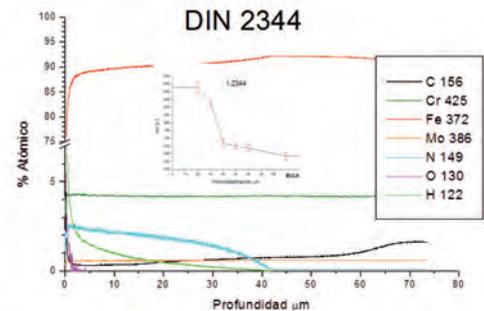


Fig. 1b

Fig. 1: a) Reactor PVD de AlN con capacidad para realizar procesos de nitruración+PVD *in-situ*. b) Perfil de concentración de nitrógeno en acero DIN 2344 nitrurado en el reactor de AlN (Izq)

fase austenítica en la matriz martensítica del acero. Esta reversión puede llegar a disminuir la dureza y la tenacidad del acero.

Una alternativa a los procesos de nitruración convencionales son los llamados procesos asistidos por plasma. En efecto, las nitruraciones en plasma o nitruraciones iónicas reducen notablemente el tiempo de tratamiento. No obstante, incluso estos tratamientos, si se desarrollan en sistemas convencionales, presentan duraciones de hasta 4-10 horas, suficiente para sobre-envejecer el material.

TRATAMIENTOS COMBINADOS

En este contexto, el *Centro de Ingeniería Avanzada de Superficies* de AIN está desarrollando un proyecto cuyo objetivo es implementar un novedoso proceso de nitruración en plasma adaptado al tratamiento de aceros *maraging*. El proyecto consiste fundamentalmente en el desarrollo simultáneo de procesos de envejecimiento y nitruración por plasma asistido por arco catódico.

La nitruración asistida por arco catódico es un proceso recientemente patentado¹ por AIN que permite nitrurar

aceros y otras aleaciones no-férricas en tiempos inferiores a 2 horas de tratamiento. El proceso consiste en la generación de una corriente de electrones mediante una descarga eléctrica sobre un cátodo. La Figura 1 muestra una imagen del interior del reactor de AlN y también el perfil de nitruración de un acero herramienta para trabajo en caliente según la norma DIN 1.2344. Tal proceso de nitruración se realizó en atmósfera de N₂+H₂ durante 120 minutos.

Los electrones generados son atraídos mediante un potencial positivo (1-50 voltios) hacia un ánodo situado en el otro extremo de la cámara. En su recorrido desde el cátodo al ánodo, los electrones son capaces de ionizar el gas circundante, generando así un plasma. Situando componentes en el centro del reactor y aplicando un potencial negativo, (BIAS) los iones del plasma son capaces de bombardear los materiales a estudiar de forma controlada. Este bombardeo genera un calentamiento de las piezas, que junto con la acción de resistencias de vacío son capaces de variar la temperatura de tratamiento entre 350°C y 550°C.

La nitruración se produce cuando se dan las condiciones umbral de temperatura, composición del gas e ionización. Típicamente, para aceros inoxidables del tipo AISI300 (AISI 304, 316L), la nitruración por plasma se produce cuando las temperaturas alcanzan los 450°C

¹ Patente: *Method for nitriding metal alloys and devices for carrying out said method. PCT No11156311.3*

y la presión parcial de N_2^+ no es inferior a 1×10^{-3} mbares. Adicionalmente, la presencia de gases como Ar o H_2 , en el plasma, son capaces de activar la difusión de nitrógeno. El argón, fácilmente ionizable, contribuye a incrementar la densidad del plasma y favorece el calentamiento de la muestra por efecto de bombardeo. El hidrógeno, por su parte, es un gas con capacidad reductora, que contribuye a eliminar la capa de óxido nativa propia de los metales.

Otros metales y aleaciones presentan condiciones umbrales de nitruración diferentes. Por ejemplo, las aleaciones de Ti requieren de procesos activados por plasma a temperaturas no inferiores a los $700^\circ C^2$. Los aceros de herramientas³ aleados con estructura ferrítica requieren temperaturas entre 520 y $560^\circ C$.

EJEMPLOS DE APLICACIONES INDUSTRIALES

Los sectores de aplicación de estos nuevos materiales modificados son diversos:

- Sectores en moldes de precisión de inyección de plástico o conformado (Fig. 2). En el sector del molde y matriz se emplean materiales de valor añadido en aquellas partes del molde con altas sollicitaciones mecánicas. Los aceros *maraging*, por su dureza y tenacidad son candidatos para estas aplicaciones. Sin embargo, su todavía escasa resistencia al desgaste supone una barrera de entrada. Como alternativa se utilizan materiales más caros como cerámicos o metal duro.
- Válvulas de precisión para el paso de fluidos. Estos componentes requieren de una elevada resistencia al desgaste por abrasión y a la corrosión. Hoy en día se emplean aceros inoxidables austeníticos con recargues por proyección térmica. La sustitución por aceros *maraging* proporcionaría una mayor duración gracias a sus propiedades de tenacidad a fractura en combinación con las propiedades



Fig. 2a



Fig. 2b

Fig. 2: a) Matriz de conformado de metal. b) Componentes aeronáuticos durante una nitruración iónica

antidesgaste debidas a la nitruración.

Otras aplicaciones:

- Trenes de aterrizaje en aeronáutica sometidos a tensiones por impacto y a abrasión.
- Alabes de turbinas sometidos a altos niveles de gases corrosivos y abrasión.
- Componentes ortopédicos para fijaciones, instrumental quirúrgico.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Los procesos de nitruración en plasma asistido por arco catódico se han realizado en el reactor de AIN descrito en la Fig.1.

Los ensayos se han realizado sobre probetas de acero maraging grado 300 envejecido cuya composición teórica y real medida mediante espectroscopía de emisión óptica por descarga luminiscente (GDOES) en la Tabla 1. Los

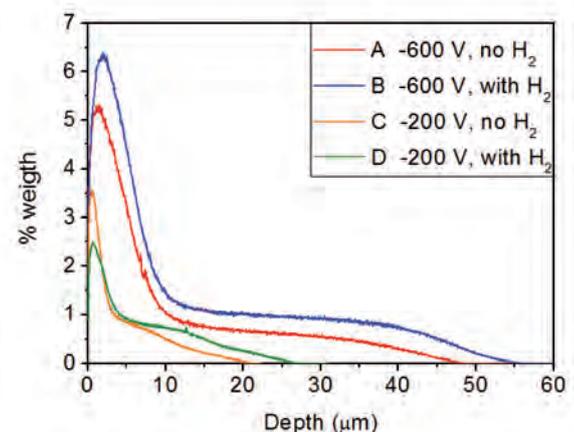


Fig. 3: Perfil de composición de nitrógeno generado sobre aceros maraging envejecidos

	C (%)	Ni (%)	Co (%)	Mo (%)	Ti (%)	Al (%)	Fe (%)
Teórica	< 0.03	17-19	8.5-9.5	4.7-5.2	0.6-0.7	< 0.15	Balance
Real	0.008	17.31	9.05	5.1	0.66	0.11	Balance

Tabla 1: Composición teórica y real de los aceros maraging 300 medida por GDOES

Proceso	Mezcla de gases	BIAS (V)	Temperatura °C	Tiempo (min)	Presión (Pa)
B6N	Ar-N ₂	- 600	480-500	90	1
B6H	Ar-N ₂ -H ₂	- 600	480-500	90	1
B2N	Ar-N ₂	- 200	480-500	90	1
B2H	Ar-N ₂ -H ₂	- 200	480-500	90	1

Tabla 2: Parámetros de nitruración investigados

² J.C. Avelar-Batista, G.G. Fuentes et al. *Surface & Coatings Technology* 201 (2006) 4335-4340

³ P. Panjan et al. *Surface and Coatings Technology* 180-181 (2004) 561-565

aceros empleados presentaban una dureza de 52 HRC, que es obtenida a partir de un doble tratamiento de recocido a 820°C de 1 hora y de envejecimiento a 485°C durante 3 horas.

Los parámetros de nitruración investigados en este artículo se representan en la Tabla 2. Se ha estudiado la composición de los gases del reactor y el voltaje aplicado a las muestras (BIAS). El tiempo de nitruración y la presión de los procesos se han mantenido en 90 minutos y 1 pascal respectivamente.

Las muestras se han caracterizado mediante GDOES para determinar los perfiles químicos de nitruración, microscopía electrónica de barrido (SEM), micro-dureza y ensayos de resistencia al desgaste.

RESULTADOS OBTENIDOS EN ACEROS MARAGING 300

La Figura 3 muestra el perfil de composición de nitrógeno generado sobre aceros maraging envejecidos. Muestra claramente cómo los perfiles de nitrógeno alcanzan las 50-60 micras de espesor en tan solo 90 minutos de tratamiento usando un BIAS de -600 V. Por el contrario, los perfiles obtenidos en las probetas nitruradas a -200 V apenas

alcanzan las 20-30 micras de profundidad. En todos los casos, el perfil de nitruración presenta una forma similar, dada por una acumulación de nitrógeno en las 10 primeras micras que alcanza entre un 2%-6% en peso, y un descenso progresivo en un perfil de difusión.

Es interesante destacar que la diferencia observada entre los perfiles obtenidos a -200 V y -600 V de BIAS no se debe únicamente a la temperatura del tratamiento, ya que en todos los casos ésta se ajustó a valores entre 480°C y 500°C. Por el contrario, los resultados sugieren que la diferente energía del bombardeo iónico parece influir en la cinética del proceso de nitruración. Los resultados también indican claramente la escasa influencia del hidrógeno en el proceso de difusión. Este hecho parece contravenir la literatura existente sobre procesos de nitruración iónica de aceros, en la que existe el consenso general de que la presencia de H₂ es imprescindible para estos procesos.

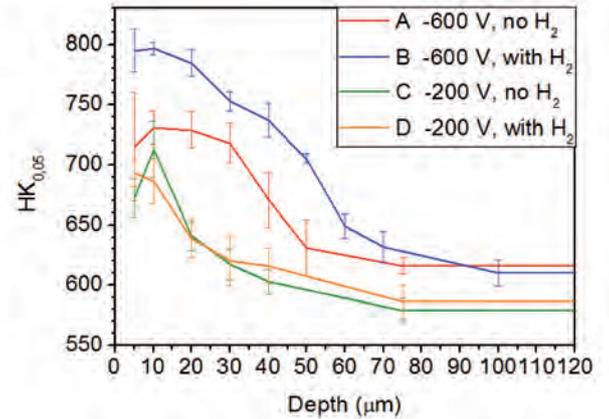


Fig. 5: Dureza Knoop HK0.05 de las muestras tratadas en función de la profundidad

La Figura 4 muestra imágenes de fractura tomadas por SEM de las secciones transversales de las muestras correspondientes a la Tabla 2. Se observa que las fractografías de los aceros cambian de forma en las primeras micras de sus superficies. Los espesores de estas zonas de fractura diferenciada se corresponden con los espesores del perfil de nitruración obtenidos en cada caso. Puede interpretarse por lo tanto que las zonas de difusión presentan propiedades mecánicas de fractura diferentes a las que presenta la matriz original. Para confirmar esta hipótesis se han medido los perfiles de dureza Knoop de las muestras tratadas en función de la profundidad, cuyos resultados se muestran en la Figura 5.

Además, es interesante destacar que no se aprecia formación de la denominada capa blanca (*white layer*), cuyo efecto de lámina de alta dureza pero de alta exfoliabilidad es indeseable para la mayoría de aplicaciones mecánicas. Esta observación aporta un valor sustancial al proceso de nitruración aquí presentado ya que, a diferencia de los procesos de nitruración convencional, el citado proceso no genera este tipo de capa.

La Fig. 5 muestra que los perfiles de dureza obtenidos en función de la profundidad de ensayo son coherentes con

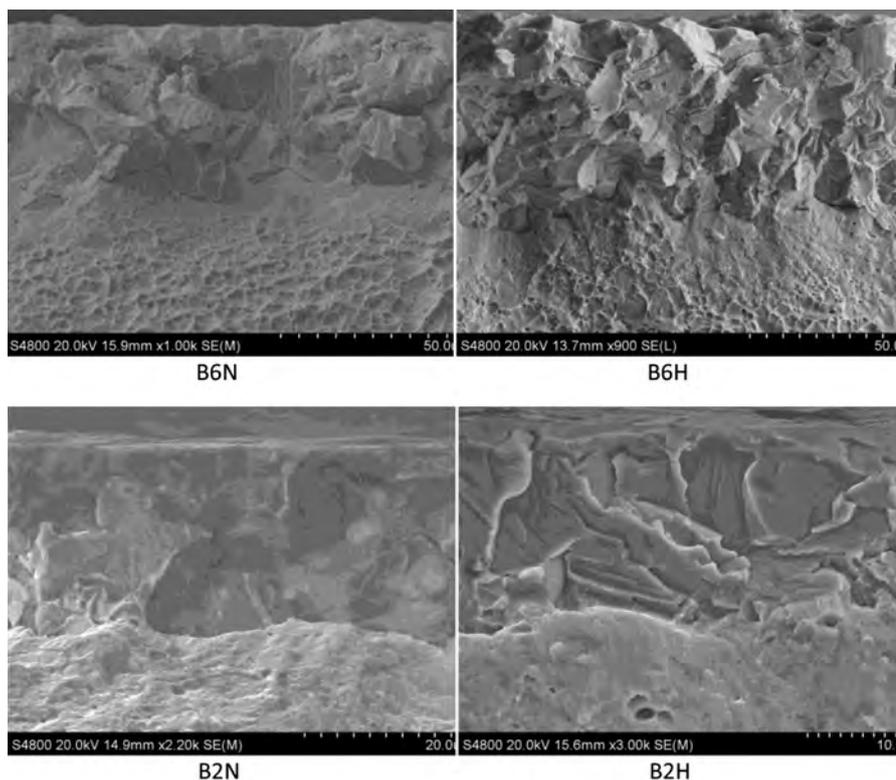


Fig. 4: Imágenes SEM de las muestras de la tabla 2 tomadas en corte transversal

⁵ Resultados del proyecto ! DUBIOP (TTC, AIN y CENIM) 2008. Presentados a la conferencia PSE 2008.

⁶ RujinTian et al. International Journal of Hydrogen Energy 31 (2006) 1874 – 1878

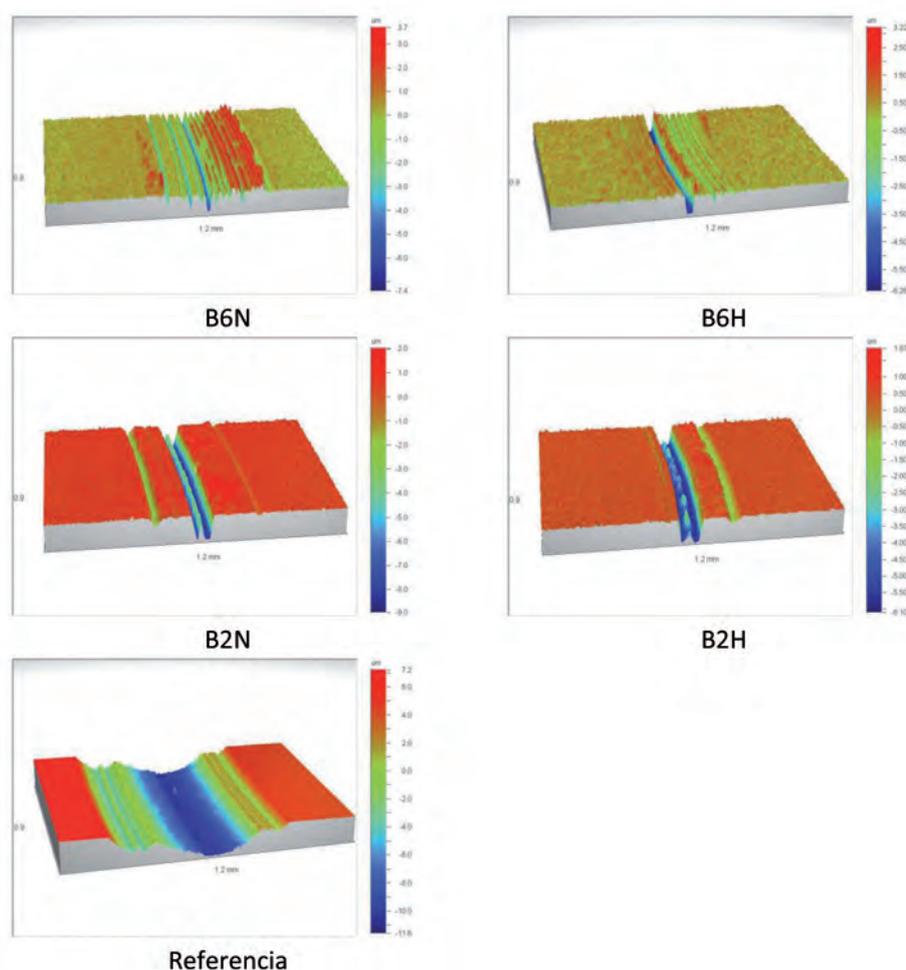


Fig. 6: Perfil 3D de desgaste generado tras un ensayo estándar sobre las muestras de la tabla 2 y el correspondiente acero de referencia

los perfiles químicos de nitrógeno obtenidos mediante análisis GDOES. Para los aceros tratados a -600 V de BIAS se observa que la dureza superficial alcanza los 750 – 800 Vickers frente a los 570 Vickers medidos para el acero envejecido y sin tratar. Se ha observado además que la dureza de volumen, definida como Dureza Rockwell, se mantiene en valores similares a los de partida, e.d. 52-53 HRC, indicando claramente que la nitruración no ha producido efecto de envejecimiento en los aceros.

Las fases formadas durante la nitruración de los aceros dependen de la naturaleza de los mismos. En general los aceros ferríticos (aceros de herramienta y de mecanizado) dan lugar a la formación de una capa de difusión, de alta dureza y tenacidad, en el que el nitrógeno está localizado en posiciones de la red intersticial, o bien formando nitruros del tipo VN, WN, AlN, etc. La capa más superficial o llamada común-

mente *compound layer* está formada por nitruros de hierro, $\epsilon\text{-Fe}_2\text{N}$, $\epsilon\text{-Fe}_3\text{N}$ principalmente, y más rara vez $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$. Esta capa posee una elevada dureza.

La nitruración de aceros austeníticos da lugar, por el contrario, a fases de austenita expandidas en general sin la presencia de nitruros de metales de transición, caracterizadas por presentar una elevada dureza (>1000 HV), y estabilidad química. De hecho, se ha encontrado que algunos aceros inoxidables del tipo 316L o 304 mejoran las propiedades mecánicas sin alterar su resistencia a la corrosión, mediante los tratamientos por nitruración por plasma⁵. Esta mejora de las propiedades mecánico-químicas ha sido ya aplicada en sectores como el de componentes en pilas de combustible⁶, sometidos a medio ácido (pH<2).

Este aumento en la dureza superficial tiene su reflejo en las propiedades tribológicas de resistencia al desgaste.

De hecho, los ensayos realizados en configuración de bola-sobre-disco en AlN así lo han mostrado. Esto se observa en la Figura 6 donde se representa el perfil 3D de desgaste generado tras un ensayo estándar a temperatura ambiente sobre las muestras de la Tabla 2 y el correspondiente acero de referencia.

Claramente se aprecia cómo el volumen desgastado tras un ensayo normalizado es superior en el caso de los aceros sin tratamiento de nitruración en comparación con los volúmenes eliminados en aquellos aceros *maraging* tratados.

CONCLUSIONES

Los tratamientos de nitruración en plasma de aceros *maraging* son factibles siempre y cuando estos no activen los mecanismos de sobre-envejecido que degradarían las propiedades del material. Para ello han de darse dos condiciones: 1) que el tratamiento no supere un umbral de temperatura, típicamente 550°C, y 2) que el tiempo de tratamiento no exceda el correspondiente a la curva de sobre-envejecido, típicamente 4 horas.

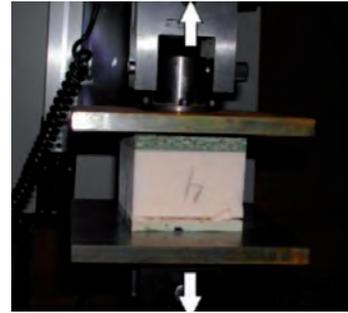
El proceso de nitruración en plasma asistido por arco catódico es idóneo para esta aplicación, ya que permite alcanzar capas de nitruración *compound layer+difusión layer* de al menos 60 micras, en tiempos inferiores a las 2 horas de tratamiento.

Este tratamiento avanzado ha demostrado además su eficacia para nitrurar aceros de herramienta, aceros inoxidables austeníticos, así como otras aleaciones no-férreas como CoCrMo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la co-financiación del Departamento de Innovación Empresa y Empleo del Gobierno de Navarra a través del proyecto *Super-Maraging* (IIQ14014).

Durabilidad y ensayos de envejecimiento acelerado en productos de construcción



DURABILITY AND ACCELERATED AGING TESTS IN CONSTRUCTION PRODUCTS

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5860> | Recibido: 30/05/2013 • Aceptado: 11/12/2013



Salvador Estrada-Martínez¹, Victoria Mollón-Sánchez² y Jorge Bonhomme-González³

¹ ITMA MATERIALS TECHNOLOGY. P. T. de Asturias, s/n - 33428 Llanera (Asturias). Tfno: +34 985 265307. salvador@itma.es

² UNIVERSIDAD DE OVIEDO. Dpto. de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Calle Independencia, 13 - 33004 Oviedo. Tfno: +34 985 181979. mollonvictoria@uniovi.es

³ Universidad de Oviedo. Dpto. de Construcción e Ingeniería de Fabricación. Campus de Gijón - 33203 Gijón. Tfno: +34 985 182258. bonhomme@uniovi.es

ABSTRACT

• This paper deals with the topic of durability of construction products, related with the Spanish legal provision Real Decreto-Ley 8/2011, which includes the obligation to carry out a technical inspection on residential buildings with more than 50 years.

The corresponding European technical entities recommend that a construction product should last for a period of 25 to 100 years, during which it has to satisfy the Essential Requirements of Directive 89/106/EEC.

Given this, it raises the question that the manufacturer needs to have a reliable and quick method that allows him to check whether a new product, that wants to manufacture, will show the desired duration. Nowadays, to solve this, there is only one method: to carry out one or several accelerated aging test procedures. In an intuitive approach, an accelerated aging test would be an intensive exposure to the same degrading agents that the product will be exposed in service. Intensive exposure means a dose of degrading agent higher than the product could receive naturally, so that within a short period of few weeks it would be obtained, over the product, the same effect that would suffer on actual years of natural exposure in service. This article displays several reflections about the troubles to find an accelerated aging test that corresponds to the natural aging. These thoughts have been collected from various researchers and authors. As an example of a construction product, we had in mind the sandwich panel, but the ideas expressed here are applicable to a wide range of construction products.

• **Key Words:** durability, accelerated aging test.

RESUMEN

El presente artículo aborda la cuestión de la durabilidad de los productos de construcción, relacionada a la entrada en vigor del Real Decreto-ley 8/2011, que recoge la obligatoriedad de realizar una inspección técnica sobre aquellos edificios de uso residencial que tengan más de 50 años.

Los correspondientes organismos técnicos europeos recomiendan para los productos de construcción una duración de al menos entre 25 y 100 años, durante los cuales han de mantener los denominados Requisitos Esenciales de la Directiva 89/106/EEC.

Ante esto surge la cuestión de que el fabricante necesita tener un sistema fiable y rápido que le permita comprobar si un producto novedoso que pretende fabricar, va a tener la duración deseable. Para solventar esto solamente existe un método, en la actualidad, que es la aplicación de uno o varios procedimientos de envejecimiento acelerado.

En una primera aproximación intuitiva, un ensayo de envejecimiento acelerado sería una exposición intensificada a los agentes degradantes a los que va a estar expuesto el producto en servicio, y que se sospecha que le afecten. Por exposición intensificada se entiende aplicar una dosis de agente degradador mayor que la que pudiera recibir de manera natural, de tal forma que en un plazo corto de unas pocas semanas se obtenga sobre el producto el mismo efecto que se tendría en años de exposición natural real en servicio.

En este artículo se exponen diversas reflexiones acerca de los problemas para encontrar un envejecimiento acelerado que se corresponda con el natural, extraídas de diversos investigadores y de los propios autores. Como ejemplo de producto de construcción se ha tenido en mente el panel *sándwich*, pero las ideas expresadas son aplicables a un rango amplio de productos de construcción.

Palabras clave: durabilidad, ensayo envejecimiento acelerado.

1. INTRODUCCIÓN

El Real Decreto-Ley 8/2011 [1] de 1 de julio introduce en la legislación española, en su artículo 21 y siguientes, la obligatoriedad de efectuar una inspección técnica de aquellos edificios de uso residencial que hayan sido construidos hace más de 50 años, salvo que las Comunidades Autónomas fijen otra antigüedad en su normativa.

El objetivo es el de dar cumplimiento a la obligación que existe, por parte del propietario, de conservar el edificio en condiciones de seguridad, tal como se indica en el artículo 9 de la Ley del suelo [2].

Esta cuestión de actualidad permite traer a colación un tema interesante como es el de la estimación de la durabilidad de un elemento o producto de construcción y la manera de predecir el tiempo que permanecerá en condiciones adecuadas. El presente artículo reúne diversas ideas, tomadas de varios investigadores y de la propia experiencia de los autores, sobre esta cuestión. Estas reflexiones se han realizado pensando en productos fabricados de madera y sus derivados, que son muy susceptibles de degradación por factores ambientales, pero también serían aplicables a elementos fabricados con otros materiales.

La Directiva 89/106/EEC [3] del Consejo, de 21 de diciembre de 1988, sobre productos de construcción, traspuesta a la legislación española en la forma del Real Decreto 1630/1992 [4], tenía por objeto garantizar la libre circulación de todos los productos de construcción en la UE mediante la armonización de las legislaciones nacionales relativas a los requisitos esenciales de estos productos en materia de salud, seguridad y bienestar. Se pretendía promover la igualdad de acceso al mercado de los fabricantes de todos los países. Para ello se creó un sistema armonizado de reglas generales para los productos de construcción, que incluyen los denominados Requisitos Esenciales (en adelante RE) como requerimientos a satisfacer. Estos RE, que todo producto de construcción tiene que satisfacer cuando forma parte de una edificación, son seis:

1. Resistencia mecánica y estabilidad.
2. Seguridad en caso de incendio.
3. Higiene, salud y medio ambiente.
4. Seguridad de utilización.
5. Protección contra el ruido.
6. Ahorro de energía y aislamiento térmico.

Existen, además, otras exigencias adicionales como la de la durabilidad, en el sentido de que esos RE han de mantenerse durante toda la vida esperada del producto.

Para cada producto de construcción, se concretan estos RE mediante especificaciones técnicas, de las que hay varios tipos:

- Normas europeas armonizadas (EN).
- Documentos de idoneidad técnica europeos, ETAG (*European Technical Approval Guideline*), conocidos en España como guía de DITE (Documento de Idoneidad Técnica Europeo). Se trata de documentos que se adoptan cuando no existe una norma armonizada, en muchas ocasiones porque el nivel de conocimiento existente, sobre ese producto, no lo permite aun. Así, estos documen-

tos dan un procedimiento para hacer la valoración de ese producto de construcción concreto, lo que le permitiría al fabricante obtener un DITE (o ETA, *European Technical Approval*).

- Otras vías de evaluación de producto en aquellos productos que no dispongan de normas ni de guía de DITE. En tal caso se admite la evaluación y comercialización del producto según otras disposiciones nacionales existentes siempre que se satisfagan los RE.

La evaluación del producto según estas especificaciones técnicas incluye procedimientos de control de la producción por parte del fabricante, evaluación a través de ensayos, certificación por terceras partes cualificadas e independientes, etc. Si se supera esa evaluación, el fabricante podrá imprimir en el producto la marca CE correspondiente, lo que le permitirá la libre circulación y utilización en toda la UE.

2. DURABILIDAD DE UN PRODUCTO DE CONSTRUCCIÓN

La durabilidad de un elemento dispuesto en un edificio se define por la capacidad que tiene de realizar la función que se le pide durante un periodo de tiempo especificado y bajo la influencia de los agentes que se prevé que van a actuar [5].

El periodo de tiempo que se exige que dure un elemento utilizado en una edificación puede variar de una aplicación a otra. En edificaciones provisionales se entiende que va ser muy corto; en edificaciones industriales donde los cambios en la actividad industrial precisan de reconstrucciones con frecuencia, puede ser suficiente con una duración de 25 años o menos. En otros casos el requerimiento puede ser mucho mayor.

En un documento de EOTA [6] sobre la cuestión, se propone como periodo de vida exigible los 25 años para aquellos productos que se pueden reparar o reemplazar con cierta facilidad en la mayoría de las construcciones. Si el producto no es sustituible o reemplazable en el edificio, la exigencia de duración del mismo sería igual que para el edificio en sí, que puede llegar a ser de hasta 100 años. La Tabla I muestra esta referencia de duración indicada en el citado documento de EOTA.

Esta duración de cada producto de construcción no se interpreta como que el fabricante deba dar una garantía al respecto, sino que se considera únicamente como una guía de

Duración en funcionamiento, estimada, de la edificación (años)		Duración de los productos de construcción que se debe estimar en las normas armonizadas, guías de DITE y ETAs (años)		
Categoría	Años	Categoría		
		Reparable o reemplazable fácilmente	Reparable o reemplazable con cierto esfuerzo	Para toda la vida de la edificación ²
Corto	10	10 ¹	10	10
Medio	25	10 ¹	25	25
Normal	50	10 ¹	25	50
Largo	100	10 ¹	25	100

¹ En casos excepcionales y justificados, como en el de ciertos productos de reparación, se pueden prever una vida útil de 3 a 6 años.

² Cuando no es el caso de reparable o reemplazable fácilmente ni tampoco con cierto esfuerzo.

Tabla I: Duración de los productos de construcción

vida esperada económicamente razonable, con vistas a elegir el producto correcto. Para EOTA y para CEN, la duración en funcionamiento de un producto debe entenderse como una referencia a considerar cuando se va a establecer el tipo y agresividad del método de verificación del producto (por ejemplo el número de ciclos de congelación-descongelación en un ensayo) y las precauciones a tomar relativas a su durabilidad.

El problema es que un fabricante no puede esperar décadas para comprobar si el producto que pretende fabricar va a tener realmente una duración adecuada, necesita un camino más rápido para estimar esa duración. Asimismo, los potenciales clientes y usuarios también demandan garantías de que la duración de un producto novedoso va a ser satisfactoria y suficiente.

Desafortunadamente la experiencia demuestra que es frecuente que haya productos de construcción que no satisfagan los requisitos exigibles, aun después de un relativamente corto periodo de uso [7]; esto origina costes de revisión, de sustitución, riesgos para la salud, etc.

Un ejemplo para ilustrar esto es el de los elementos de uso exterior fabricados con materiales compuestos de madera y plástico (WPC, *Wood-Plastic-Composites*), que surgieron en Estados Unidos en la década de 1960. La fabricación y comercialización de elementos fabricados con estos materiales creció desde cero hasta cerca de un millón de toneladas en un lapso de tiempo de poco más de una década, sin contar, en aquellos años, con métodos de ensayo ni con información suficiente para hacer predicciones sobre como envejecerían bajo los efectos del clima [8]. Así, resultó que elementos tales como suelos o barandillas experimentaron fenómenos de hinchado, rajado, retorcimiento, decoloración, erosión por agua, aparición de manchas, crecimiento de moho, ataque de insectos, hongos, etc. Fue años después de haber empezado a utilizarse ampliamente este tipo de material cuando empezó a haber datos disponibles, procedentes de estudios sobre su degradación por envejecimiento. Esto resulta muy útil para los fabricantes, ya que la existencia de este conocimiento facilita que estos materiales se puedan emplear para fabricar un mayor rango de productos y no solo suelos y barandillas que era su aplicación inicial [9, 10].

Los datos que pueden encontrarse en la literatura sobre los periodos de vida de los diversos productos de construcción se obtienen a través de distintos métodos. Usualmente hay tres categorías principales dentro de estos datos [5, 11, 12]:

- Datos de vida en servicio obtenidos de la experiencia, tal como: peritaciones en compra-ventas, reparaciones, modificaciones, reclamaciones, etc.
- Datos obtenidos por la experiencia de realizar mantenimientos a intervalos de tiempo prefijados.
- Información procedente de investigaciones a través de ensayos acelerados o de ensayos de larga duración sobre materiales y componentes.

En la Figura 1, tomada por los autores, puede verse un panel sándwich de caras metálicas y núcleo de espuma poli-mérica tras ser retirado, durante la realización de trabajos de mantenimiento, de la cubierta donde había permanecido varios años; se aprecia que la adherencia entre las distintas capas que lo componen, y que es una característica de suma importancia en este producto, está mermada.



Fig. 1: Panel sándwich de caras metálicas envejecido tras muchos años instalado en una cubierta

Actualmente no hay un método para predecir exactamente el periodo de vida de un elemento de construcción, pero se pueden hacer algunos razonamientos para centrar el problema. Primeramente podría considerarse que un elemento alcanza su límite de durabilidad por cuestiones puramente mecánicas o por cuestiones no mecánicas.

3. LIMITE DE DURABILIDAD POR RAZONES MECÁNICAS Y NO MECÁNICAS

Además de alcanzarse el límite de durabilidad por razones estrictamente mecánicas, no hay que olvidar que también se puede alcanzar ese límite por otras razones: físicas, económicas, culturales u otras, como por ejemplo que el aislamiento térmico ya no es suficiente, o el aspecto estético no cumple sus objetivos.

En cuanto al límite por razones mecánicas, el planteamiento que Davies [13] recoge, al respecto, resulta muy interesante.

En un elemento de construcción hay una relación antagónica entre su resistencia y la carga que ha de soportar; esta carga puede ser permanente, o causada por el viento, nieve, etc. o por una combinación de varias cargas.

Sea $S_d(t)$ el valor de diseño de la carga, que será función del tiempo de vida que tiene el elemento (t). Hay que considerar que los valores de diseño de la carga de viento o nieve se estiman considerando un periodo de retorno de 50 años, de manera que para un tiempo t , la vida que le queda al elemento es ese número de años menos t .

Entonces, para cargas de origen natural, la carga máxima que se podría esperar que aconteciera, decrece según va disminuyendo la vida que le queda al elemento. La carga máxima que se podría esperar es, por lo tanto, menor para un corto periodo de tiempo que para uno largo, de ahí que la curva de S presente un aspecto descendente (ver Figura 2).

Por otra parte sea $R_d(t)$ la resistencia de diseño de la estructura, que será función del tiempo t . Esta resistencia puede verse afectada por el efecto de la carga, por el efecto de factores ambientales como la humedad y la temperatura o por otras razones; esto significa que las propiedades mecánicas o resistencia del elemento, descienden con el tiempo, tal como se puede ver en el aspecto decreciente de la curva de R .

Entonces, se alcanzará el límite de durabilidad de un elemento cuando el valor de la acción que sufre el elemento supera a la resistencia del mismo, de manera que el elemento ya no es capaz de soportar la carga de diseño, tal como se ilustra

en la Figura 2. Matemáticamente este límite se alcanza cuando ya no se cumple la siguiente ecuación:

$$S_d(t) \leq R_d(t) \quad (1)$$

Si la resistencia R se reduce más rápidamente que la carga S , la vida de la estructura puede llegar a su final por consideraciones de durabilidad mecánica. En la Figura 2 el tiempo de vida de la estructura t_f se alcanza cuando $S(t) \geq R(t)$.

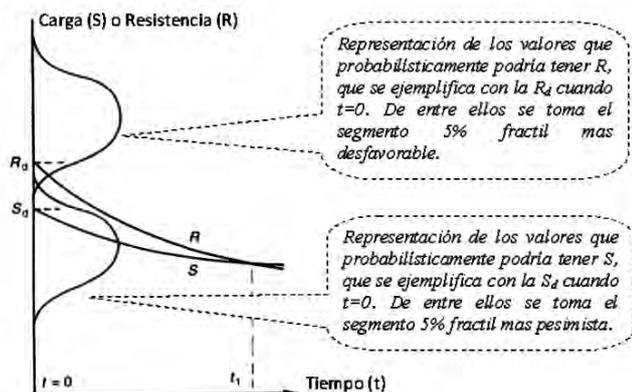


Fig. 2: Variación de las acciones $S(t)$ y de la resistencia $R(t)$ de un elemento de construcción con el tiempo

Al razonamiento expuesto han de añadirse los pertinentes factores de seguridad: las acciones se corrigen con el factor γ_q para ponderar la estimación de que el evento climático máximo ocurra dentro de un tiempo de 50 años, mientras que la resistencia se divide por el factor de seguridad del material γ_M

$$S_d = \gamma_q S_k < R_k / \gamma_M = R_d \quad (2)$$

Donde los valores con subíndice k son valores característicos determinados con el 5% valor fractil.

La manera teóricamente correcta de calcular el periodo de vida esperado de una estructura debería obtenerse resolviendo la ecuación $S_d(t) \leq R_d(t)$, de tal manera que, por ejemplo, una cierta población definida de elementos no cumpla la expresión $S_d = \gamma_q S_k < R_k / \gamma_M = R_d$

Como ejemplo, si esa proporción es del 50%, de tal manera que el valor característico es igual a la media, la expresión quedaría así:

$$S_m(t) < R_m(t) \quad (3)$$

El problema es que no se conoce bien cómo cambia la resistencia con respecto al tiempo y con respecto a diferentes acciones. Tampoco se conoce con certeza la evolución de las acciones con respecto al tiempo. Por lo tanto no es posible, actualmente, resolver la ecuación, planteada, de la durabilidad. Algunas de las causas por las que resulta difícil predecir la durabilidad son [12]:

- Los mecanismos de degradación presentes en el deterioro del elemento suelen depender de varios factores, los cuales afectan al proceso de una manera sinérgica, y el

modo de fallo dominante puede ser distinto para entornos ambientales diferentes.

- Usualmente la degradación se produce de una manera tan lenta que el tiempo necesario para obtener suficientes ejemplos de fallo resulta muy largo.
- La variabilidad de un grupo de muestras puede ser grande.
- En los ensayos de largo plazo en condiciones reales resulta difícil medir el efecto de la degradación.

La manera más usual de tratar de resolver el problema implica el empleo de los métodos de ensayo acelerados de laboratorio, específicos para cada material o producto de construcción [7].

4. ENSAYOS DE ENVEJECIMIENTO ACELERADO

Como se ha visto en el apartado anterior, la resistencia de diseño de una estructura $R_d(t)$ decrece con el tiempo debido a diversos factores. Algunos factores o agentes de degradación a tener en cuenta son [7]:

- Viento, lluvia, nieve y granizo.
- Humedad (niebla, lluvia y condensación).
- Variaciones de temperatura (choques térmicos súbitos, gradientes de temperatura, altas temperaturas mantenidos en el tiempo por presencia de chimeneas, ciclos de congelación-descongelación por valores extremos climáticos, etc.).
- Radiación solar.
- Condiciones de utilización del edificio (cargas, impactos, mantenimiento, etc.).
- Contaminación atmosférica.
- Actividad de organismos vivos.

En la Figura 3 tomada por los autores, puede verse una cubierta. Se observa como en las juntas frontales entre paneles, donde éstos apoyan sobre la correa, se van acumulando restos de polvo y tierra arrastrados por el viento; posteriormente, sobre estas grietas rellenas de materia orgánica crece la hierba que retiene la humedad y va provocando un daño al panel, precisamente en la zona comprometida de apoyo del mismo sobre la correa, lo que puede llegar a producir el fallo de la estructura, especialmente en cubiertas visitables.

Ante la necesidad de disponer de métodos para predecir la durabilidad de los elementos y productos empleados en construcción, se han ido desarrollando, históricamente, una gran cantidad de procedimientos de ensayo acelerado; en este apartado no se dará una relación de cada uno de ellos, lo que sería una tarea ingente (existen estudios que recopilan y analizan estos procedimientos, como la publicada recientemente



Fig. 3: Cubierta de nave con juntas rellenas de vegetación y vista del interior del deterioro causado en el apoyo sobre la correa

por Daniotti y Cecconi [14] o la realizada por el *Australian Building Codes Board* [15], sino que se esbozarán algunas ideas generales sobre los problemas y utilidad de los mismos.

Los métodos de ensayo acelerado aportan información sobre elementos de construcción poco estudiados, ayudándose de la comparación con otros elementos tradicionales de reconocido buen funcionamiento y de los que existe experiencia histórica acumulada. Cabe advertir aquí que aunque se tenga información de la duración estimada de un material o un producto, esta duración puede verse prolongada o acortada por la modificación de las condiciones de uso o por las condiciones más o menos agresivas particulares a las que esté expuesto.

Definiremos ensayo de envejecimiento como aquel ensayo en el cual los materiales o productos de construcción se exponen a agentes que se cree que le pueden causar degradación, mientras que un ensayo de envejecimiento acelerado sería aquel ensayo de envejecimiento en el cual la degradación se acelera intencionadamente por encima de la que se espera que aparezca en condiciones de servicio real [16].

Obviamente estos métodos de ensayo acelerado no deben requerir tiempos excesivamente largos para proporcionar resultados. Un ensayo acelerado ideal sería aquel que, evaluando un elemento durante unas pocas semanas, permitiera obtener predicciones de su comportamiento en un ambiente real de servicio a lo largo de los años. Sin embargo, algunos investigadores cuestionan la fiabilidad de los ensayos de envejecimiento acelerado ya que al tratar de imprimir a un material un daño de una manera veloz, éste se ve sometido a acciones que no son realistas.

Algunos autores nos alertan de que los ensayos acelerados ha de aplicarse y evaluarse con gran cautela por diversas razones [7, 17].

En primer lugar, no hay una descripción, fuera de toda duda, de lo que es un clima ambiente, ya que el clima es algo errático que no se corresponde con un listado de variables definidas por un valor medio y una desviación típica. Los climas son muy variables y conllevan muchos elementos; piénsese en todas las combinaciones posibles de temperatura, humedad ambiente, condensación sobre superficie, congelación-descongelación del agua, velocidad y dirección del viento, erosión, acción de microorganismos, lluvia, radiación solar, e incluso efectos de tipo climático provocados por la acción del hombre, tales como ataque por contaminantes químicos (la norma ASTM D1828 [18] distingue entre ambiente rural con atmosfera pura y ambiente industrial con presencia de gases sulfurosos, entre otros), etc.

Además está la cuestión de las diferencias geográficas: los investigadores saben que no se pueden aplicar los resultados de ensayos ambientales reales realizados en Norte América o en Europa a otros climas diferentes tales como el de Japón [19, 20].

Aun sin tener en cuenta esto, esas variables en campo abierto no coinciden con las que pueden darse, por ejemplo, en un elemento de tejado tal como un panel sándwich, en el que al otro lado del mismo las variables son las del interior de un hogar, completamente distintas; o donde en una esquina concreta se tiene un microclima diferente del que hay unas decenas de metros más allá. Un ejemplo de esto, en relación al contenido real de humedad en el interior de paneles de muro,

lo describe Kerkkänen [21] con el trabajo realizado por Paroc Co, que realizó mediciones comparando la humedad relativa entre diversas partes interiores del muro; para ello se instalaron sensores dentro del panel, cerca de la superficie y se tomaron medidas desde febrero a octubre, a las 7 horas a.m., lo que significaba que el calor del sol apenas influyó en la temperatura de las superficies. Los resultados mostraron que puede haber una gran diferencia de humedad en función de la orientación de la cara del panel.

En muchas ocasiones, los esfuerzos simplificadores para correlacionar todas estas variables, simplemente no funcionan. Así, por ejemplo, el mantenimiento de una temperatura constante, a la par que se provoca un ciclado de humedad, es un fenómeno que no se corresponde con un comportamiento real del clima, ya que en la realidad una disminución en la humedad relativa va acompañada usualmente de un incremento en la temperatura y viceversa. O el mar en las zonas costeras resulta mucho más corrosivo que el agua de mar artificial de 3% en peso de NaCl que se emplea usualmente en laboratorio, ya que aquel contiene muchas otras sustancias [7].

En segundo lugar está la manera en que los materiales se exponen al clima. La mayoría de los ensayos de exposición ambiental se diseñan para acelerar los efectos ambientales, no para aproximarse a estos efectos. Por lo tanto, las condiciones seleccionadas no representan ningún ambiente de servicio esperado. Aun cuando la temperatura y las condiciones de humedad seleccionadas estén dentro del rango encontrado en ambientes de servicio, los ciclos empleados usualmente tienen lugar a una frecuencia mayor que la natural. Otra cuestión es que el efecto de la humedad y temperatura (y otros productos químicos) sobre un elemento se ve incrementado por la tensión mecánica a la que está sometida, y por tanto habría que mantener en ese estado tensional la probeta empleada durante el ensayo acelerado.

Tampoco se consigue el mismo efecto con la exposición completa de un elemento de gran tamaño a unas condiciones de ensayo determinadas de humedad, como por ejemplo un panel sándwich de 2,5 x 0,6 metros, que con la exposición de probetas extraídas del mismo y que midan unos pocos centímetros. En ese ejemplo las probetas presentan una proporción de junta lateral abierta mucho mayor que la que presentaría el panel sándwich completo. Estos conflictos son discutidos por los investigadores, muchos de los cuales sostienen que no se deberían someter a esfuerzos exagerados a los materiales de construcción cuando se evalúa su durabilidad. Y sobre todo hay que asegurarse de no generar mecanismos de degradación o reacciones químicas en los materiales que no se generarían en el proceso de envejecimiento natural que se pretenda imitar [7].

Por tanto no hay una manera consensuada de exponer un elemento al clima, y por ello los resultados de los estudios climáticos no pueden trasladarse al comportamiento de ningún ambiente de servicio particular.

En tercer lugar, está la necesidad de establecer correlaciones o extrapolaciones entre el envejecimiento acelerado y el envejecimiento natural; la cuestión es que la pérdida de resistencia para muchos materiales durante el envejecimiento natural no es continua y lineal con el tiempo de exposición. Por ejemplo, se puede perder mucha resistencia en invierno

y menos en verano. Como ejemplo se tienen los tableros de virutas unidos con fenólicos que presentan un patrón general de pérdida rápida de resistencia y rigidez durante el primer año o dos de exposición, para pasar a tener un ritmo de pérdida de resistencia mucho menor en los años siguientes. En otras ocasiones, el material varía con las variables del clima, como por ejemplo algunos materiales plásticos que prosiguen su curado tras la fabricación y por lo tanto varían en rigidez y flexibilidad. A esto hay que añadir que en general los procedimientos existentes tienen en cuenta los efectos producidos por uno o dos agentes únicamente, mientras que en las exposiciones reales están presentes los efectos sinérgicos de varios agentes [14].

También hay que tener en cuenta que el uso de la extrapolación de los resultados, el limitado número de probetas que se pueden ensayar, y otras cuestiones conllevan problemas de evaluación estadística [5, 22], lo que finalmente hace que como mucho se puedan extraer patrones, tendencias, que al desarrollarse en el envejecimiento acelerado, también tengan lugar cuando los mismos materiales se exponen a exposición natural.

Guillespie [17] analiza el interesante punto de vista de Gressel [23, 24, 25] quien estudió los problemas asociados con la evaluación de la durabilidad de los tableros de partículas a partir de una experimentación laboriosa que se prolongó durante varios años. En la búsqueda de procedimientos que arrojaran luz sobre los mecanismos de degradación más importantes que actúan sobre los sistemas de madera-adhesivo, y que pudieran ser independientes del tipo de adhesivo implicado, comparó exposiciones ambientales durante 9 años, de probetas expuestas a ambiente exterior protegido y a ambiente exterior no protegido con resultados procedentes de ensayos de envejecimiento en laboratorio. En ambos casos con probetas bajo estados tensionales y con probetas sin tensión.

Concluyó que ni los ensayos de exposición ambiental, ni los ensayos acelerados en laboratorio eran suficientes por sí mismos para dar una evaluación correcta de la durabilidad del adhesivo del tablero de partículas. Sugirió abordar el problema con dos tipos de procedimientos de ensayo, cada uno de los cuales daría información sobre la degradación, y por tanto sin un único ensayo que solucionara el interrogante de la durabilidad:

- Ensayos de comportamiento que empleasen deliberadamente condiciones que excedieran considerablemente aquellas encontradas en el ambiente natural esperado y
- Ensayos ajustados a los ambientes climáticos que aproximadamente se dieran en las condiciones de servicio.

Cada ensayo daría un cierto tipo de información relativa a mecanismos de degradación específicos.

5. ENSAYOS DE CONTROL DE CALIDAD

Debe tenerse en cuenta que los procedimientos de ensayo diseñados para evaluar la durabilidad de un elemento han de ser, lógicamente, diferentes de aquellos usados para el control de calidad de fabricación. Los mismos procedimientos de ensayo no sirven para ambos propósitos.

Los envejecimientos acelerados de evaluación de la du-

rabilidad tienen como objetivo principal la demostración de que un elemento puede comportarse como se desea durante muchos años en ambiente climático. Son ensayos largos, laboriosos, complejos y que requieren muchas probetas, equipamiento especializado y personas capacitadas. Son ensayos necesarios para chequear, desarrollar, certificar, y/o cualificar un nuevo producto. A veces incluso hay que desarrollar un procedimiento o adaptar uno existente.

Por el contrario los ensayos de control de calidad han de ser rápidos y baratos, y su objetivo es la detección de un producto mal fabricado, una unión adhesiva incorrecta, etc.

No obstante, a veces hay productos novedosos que ya están en el mercado y para los que no hay procedimientos de ensayo adecuados para el control de calidad. En ese caso, el ingeniero se ve obligado a tomar procedimientos de evaluación de la durabilidad para el propósito del control de calidad como única forma de dar un nivel de confianza que sea aceptado por el cliente, el comprador u otro agente implicado. Debido a esto, a veces la frontera entre ambos tipos de ensayo puede confundirse. En la figura 4 puede verse el ensayo de tracción perpendicular a las caras conforme a las indicaciones de la guía ETAG 016 [26]. Este ensayo se utiliza para evaluar la evolución de la resistencia de la unión adhesiva entre materiales diferentes que forman un panel sándwich, cuando esa unión ha sido sometida a un ensayo de envejecimiento acelerado. Aunque forma parte de un ensayo de evaluación dentro de un proceso de DITE, ese mismo ensayo de tracción puede emplearse también dentro de la colección de ensayos rutinarios del control de calidad.

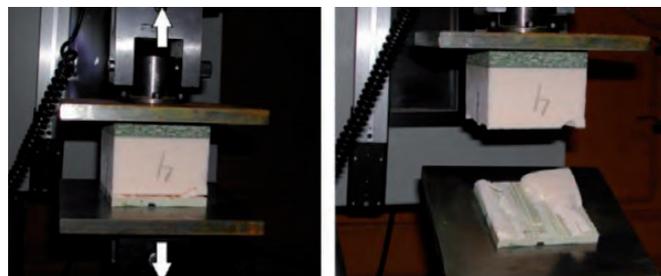


Fig. 4: Ensayo de tracción perpendicular a las caras de panel sándwich de caras de madera.

6. CONCLUSIONES

Persiste aun mucha controversia en cuanto a los métodos empleados para acelerar los efectos del envejecimiento en un producto de construcción.

Diferentes investigadores tienen diferentes filosofías para aproximarse a la evaluación de la durabilidad: algunos prefieren simular condiciones ambientales que no sobrepasen en intensidad a aquellas que hay en la naturaleza, mientras que otros incrementan los parámetros de ensayo mucho más allá de las condiciones naturales.

Si bien existen multitud de procedimientos de envejecimiento que se han ido desarrollando y probando históricamente, en muchas ocasiones esta información no es fácilmente accesible o el propósito original y la bondad del mismo no están claros.

Algunos procedimientos de ensayo acelerado que preten-

den evaluar la durabilidad de componentes de construcción han demostrado ser erróneos, mal interpretados, aplicados incorrectamente o escasamente aplicables.

Otras veces el procedimiento de ensayo especificado para un producto determinado (por ejemplo para un panel sándwich de caras metálicas) es utilizado con otro producto que se cree similar a aquel (un panel sándwich de caras derivadas de la madera, por ejemplo), pudiéndose llegar a resultados erróneos.

Por último la durabilidad de los elementos compuestos por varios materiales depende de la durabilidad de todos los componentes que los integran: sustratos, adhesivos e intercaras. Hay ensayos que analizan la durabilidad del adhesivo, otros la del sustrato, otros la de la unión adhesiva y todos aportan información, pero es difícil encontrar un único ensayo que dé respuesta a todas las cuestiones sobre la durabilidad de ese elemento compuesto.

Por tanto, sigue habiendo una necesidad de desarrollar nuevos procedimientos de envejecimiento acelerado capaces de evaluar nuevos productos y materiales, así como desarrollar también procedimientos para el control de calidad. Es necesario aplicar nuevos enfoques, acumular más información y alcanzar desarrollos matemáticos y teorías que permitan hacer mejores predicciones.

Actualmente no existe alternativa al uso de métodos de envejecimiento acelerado en la evaluación de la durabilidad. Para llevar a cabo un estudio de envejecimiento en materiales de construcción se debe estudiar en profundidad los métodos existentes, evaluar sus limitaciones, el ámbito en el que se pueden aplicar, y, si es posible, abordar el problema empleando varios métodos de ensayo. En cualquier caso, el estudio de la durabilidad de los materiales y los ensayos de envejecimiento acelerado tienen aún por delante un campo de investigación muy extenso, por lo que técnicos y científicos siguen trabajando en este campo para tratar de dar respuesta a las numerosas cuestiones todavía sin resolver.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] España. Real Decreto-ley 8/2011, de 1 de julio, de medidas de apoyo a los deudores hipotecarios, de control del gasto público y cancelación de deudas con empresas y autónomos contraídas por las entidades locales, de fomento de la actividad empresarial e impulso de la rehabilitación y de simplificación administrativa. *Boletín Oficial del Estado*, 7 de julio de 2011, núm 161, p. 71548.
- [2] España. Real Decreto Legislativo 2/2008, de 20 de junio, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Suelo. *Boletín Oficial del Estado*, 26 de junio de 2008, núm 154, p. 28482.
- [3] European Union. Council Directive 89/106/EEC of 21 December 1988 on the approximation of laws, regulations and administrative provisions of the Member States relating to construction products. *Official Journal of the European Communities*, 11 February 1989, L 40, Vol. 32, p. 12.
- [4] España. Real Decreto 1630/1992, de 29 de diciembre, por el que se dictan disposiciones para la libre circulación de productos de construcción, en aplicación de la Directiva 89/106/CEE. *Boletín Oficial del Estado*, 9 de febrero de 1993, núm 34, p. 3658.
- [5] Jernberg P, Sjöström C, Lacasse MA, et al. *Guide and bibliography to Service Life and Durability research for Buildings and Components*. CIB Publication N° 295, 2004. ISBN 90-6363-041-7.
- [6] European Organisation for Technical Approvals. *Assumption of working life of construction products in Guidelines for European*

Technical Approvals and Harmonized Standards. Guidance Document 002. Edition December 1999.

- [7] Jelle BP. "Accelerated climate ageing of building materials, components and structures in the laboratory". *Journal of Materials Science*. Marzo 2012. Vol.47 p.6475-6496. (doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-012-6349-7>)
- [8] Schut, JH. "Wood-plastic composites: weathering quality issues". *Plastics Technology*. Septiembre 2005.
- [9] Schirp A, Wolcott MP. "Influence of fungal decay and moisture absorption on mechanical properties of extruded wood-plastic composites". *Wood and Fiber Science*. Octubre 2005. Vol.37-4 p.643-652.
- [10] Markarian J. "Wood-plastic composites: current trends in materials and processing". *Plastics, Additives and Compounding*. Septiembre-Octubre 2005. Vol.7-5 p.20-26. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S1464-391X\(05\)70453-0](http://dx.doi.org/10.1016/S1464-391X(05)70453-0))
- [11] Masters LW, Brandt E. "Prediction of service life of building materials and components". *Materials and Structures*. 1987. Vol.20 p.55-77. (doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02472728>)
- [12] Marteinsson B. "Service Life Estimation in the Design of Buildings - A Development of the Factor Method". Directores: Sjöström C, Söderström O, Jernberg P. Universidad Gävle en Suecia. Department of Technology and Built Environment, 2005.
- [13] Davies JM. *Lightweight sandwich construction*. 1st edition. London?: Blackwell Science Ltd., 2001. 370p. ISBN: 0-632-04027-0. (doi: <http://dx.doi.org/10.1002/9780470690253>)
- [14] Daniotti B, Cecconi FR. *CIB W080: Test methods for service life prediction*. CIB Publication 331, 2010. 102p. ISBN: 978-90-6363-062-1.
- [15] *Guideline on durability in buildings*: Australian Building Codes Board, 2003. 14 p.
- [16] Masters LW, Brandt E. "Systematic methodology for service life prediction of building materials and components". *Materials and Structures*. Septiembre 1989. Vol.22-5 p.385-392. (doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02472509>)
- [17] Guillespie RH. "Accelerated aging of wood-based panel products: a review and commentary". En: *Proceedings of a Workshop on the Durability of Structural Panels, (Pensacola, Florida October 5-7, 1982)*. Edited by Eddie W. Price. 1984. p. 11-26.
- [18] ASTM. *Standard practice for atmospheric exposure of adhesive-bonded joints and structures*. D1828-70 (Reapproved 1987). Philadelphia: ASTM, 1997.
- [19] Kojima Y, Suzuki S. "Evaluation of wood-based panel durability using bending properties after accelerated aging treatments". *Journal of Wood Science*. 2011. Vol.57-2 p.126-133. (doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10086-010-1146-x>)
- [20] Kojima Y, Suzuki S. "Evaluating the durability of wood-based panels using internal bond strength results from accelerated aging treatments". *Journal of Wood Science*. 2011. Vol.57-1 p.7-13. (doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10086-010-1131-4>)
- [21] Kerkkänen T, Tiainen T. *Durability of different types of sandwich panels under climatic conditions. Report 15/1999*. Tampere, Finland: Tampere University of Technology Institute of Materials Science, 1999. 26 p.
- [22] Escobar LA, Meeker WQ. "A review of accelerated test models". *Statistical Science*. 2006. Vol.21-4 p.552-577. (doi: <http://dx.doi.org/10.1214/08834230600000321>)
- [23] Gressel P. "Chipboard adhesive durability assessment: A contribution to the formulation of glue-independent test guidelines: Part 1, Statement of the problem- Test planning and execution- Results". *Holz als Roh- und Werkstoff*. 1980. Vol.38-1 p.17-35.
- [24] Gressel P. "Testing and judging the durability of particleboard adhesives; a proposal for the establishment of generally valid testing guidelines. Part 2: Discussion of results". *Holz als Roh- und Werkstoff*. 1980. Vol.38-2 p.61-71.
- [25] Gressel P. "Chipboard adhesive durability testing and assessment. A contribution to the formulation of glue independent test guidelines: Part 3: Conclusions and proposed test guidelines". *Holz als Roh- und Werkstoff*. 1980. Vol.38-3 p.109-113.
- [26] European Organisation for Technical Approvals. *Guideline for European Technical Approval of Self-supporting Composite Lightweight Panels. Part 2: Specific aspects relating to Self-supporting Composite Lightweight Panels for use in roofs*. ETAG 016. Edition November 2003. Brussels: European Organisation for Technical Approvals, EOTA. 2003.

Análisis del impacto de un sistema inteligente de transporte sobre una red de distribución.

Basado en simulación dinámica por eventos discretos y test anova

IMPACT OF AN INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEM ON A DISTRIBUTION NETWORK.
THROUGH THE APPLICATION OF DISCRETE-EVENT SIMULATION AND ANOVA TEST

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5858> | Recibido: 30/05/2013 • Aceptado: 04/09/2013



RESUMEN

Los sistemas inteligentes de transporte (SIT) tienen el potencial de mejorar la eficiencia de una red de distribución al facilitar la toma de decisiones en tiempo real. En este artículo se analiza, mediante un caso de estudio, el beneficio reportado por un SIT en una red de distribución de mercancía perecedera ante distintas configuraciones de red y distintas condiciones ambientales.

En el caso, el SIT sirve como apoyo ofreciendo una mayor visibilidad sobre la calidad de los productos transportados y sobre nuevas solicitudes de carga de otros proveedores. El SIT también permite la selección del flujo logístico más eficiente durante el transporte. El análisis se lleva por medio de un modelo de simulación por eventos discretos y un test ANOVA.

Palabras clave: Sistema Inteligente de Transporte, simulación, ANOVA, productos perecederos, flujos logísticos.

■■■■
Lorena Polo-Navarro, David Ciprés-Bagüeste,
Miriam García-Milla

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ARAGÓN. División de Logística.
C/María de Luna, 8 - 50018 Zaragoza. Tfno: +34 976 011852

ABSTRACT

• Intelligent Transportation Systems (ITS) have the potential to improve the efficiency of a distribution network facilitating decision-making in real time. In this paper, we analyze with a case study the profit reported by an ITS in a perishable goods distribution network under different network configurations and different environmental conditions. An ITS serves as support in three areas of decision making: Assignment to logistic flow, new collection orders from suppliers and detection and management of degraded merchandise. The analysis have been developed through a dynamic simulation model and an ANOVA test.

• **Keywords:** Intelligent Transportation System, crossdocking, perishables, simulation, logistic flows design.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas inteligentes de transporte (SIT) son una combinación de información, comunicaciones y tecnologías en vehículos e infraestructuras que nacen con un triple objetivo: eficacia, eficiencia y seguridad [1]. La principal funcionalidad de estos sistemas consiste en obtener, procesar y distribuir información. Esto conduce a una mayor visibilidad sobre la flota de transporte y sobre las condiciones de los vehículos en tiempo real. Con esta información, el gestor de la flota puede tomar la decisión más conveniente en cada momento.

En la logística alimentaria, buena parte del éxito reside en la captación y la gestión de la información durante los procesos. Parámetros como la temperatura, la humedad y la circulación del aire pueden alterar las propiedades organolépticas (sabor, textura, olor, color) de los alimentos y comprometer su calidad [2].

El desarrollo de las tecnologías asociadas a los SIT abre la posibilidad de perfeccionar la monitorización de parámetros influyentes sobre los productos durante el transporte. Algunos ejemplos de tecnologías aplicadas a los SIT son los siguientes:

- Sistemas de localización por satélite, que permiten determinar en cualquier parte del mundo la posición de un vehículo con un pequeño margen de error.
- Redes de sensores inalámbricas, que capturan información de distintas magnitudes que pueden afectar a los productos como temperatura, humedad, vibraciones o luminosidad.

- Sistemas de identificación RFID, que permiten registrar y obtener información de los productos a lo largo de la cadena de suministro por medio de etiquetas adheridas a los mismos.
- Redes de comunicación inalámbricas (*Bluetooth, WIFI,...*), que posibilitan el envío de información entre dispositivos con distintos alcances.

Un sistema inteligente de transporte permite la aplicación conjunta de éstas y otras tecnologías al proceso de toma de decisiones. El área de decisión asociada a los SIT más referida en la literatura científica es la replanificación de rutas ante cambios en la demanda [3] y ante cambios en el tiempo previsto de viaje [4, 5]. Los procesos de distribución de mercancías pueden verse comprometidos por distintos factores (solicitud de nuevas cargas, averías, degradación de los productos, congestiones, etc.). La captura y la gestión de esta información de forma dinámica permiten replanificar en tiempo real los procesos de transporte de la manera más eficiente, dotando a la red de la máxima flexibilidad y rapidez de respuesta. Ante imprevistos, un sistema inteligente de transporte puede activar un sistema de alertas, proporcionar la información necesaria a los responsables de gestión, o proponer nuevas opciones de distribución.

Hay pocos estudios dedicados a analizar el impacto de la adopción de sistemas TIC en los procesos de transporte y, los que existen, se basan generalmente en análisis empírico y no en modelos analíticos y de simulación [10]. El objetivo general de este trabajo es la identificación de las funcionalidades de un sistema inteligente de transporte que mayor impacto tienen en costes y servicio para una empresa que se dedique a la distribución o transporte de productos perecederos. Se persigue además valorar el beneficio que pueden obtener dichas empresas con la implantación de sistemas de este tipo en función de las características de sus redes de distribución (alcance geográfico). Con este fin, se analiza el beneficio obtenido por la implantación de un SIT mediante la simulación de un caso de estudio basado en una configuración real de una red de distribución alimentaria. En el caso de estudio, los vehículos de la flota están dotados de un SIT mediante el cual capturan en tiempo real información de temperatura de la carga, volumen disponible y localización del vehículo durante el trayecto. El sistema registra esta información y la centraliza en un ordenador embarcado en el vehículo. El propio dispositivo puede replanificar la ruta ante la reducción de la calidad de la mercancía transportada, ante nuevas solicitudes de carga o ante una opción de distribución más eficiente. La simulación se lleva a cabo mediante un modelo de eventos discretos, que es una técnica habitual para el modelado de sistemas dinámicos. Los resultados de la simulación se evalúan mediante un test de varianza ANOVA, que persigue analizar la influencia de distintos factores sobre una o más variables y cuantificar dicho impacto.

El artículo está organizado de la manera siguiente. En la sección 2, se presenta una revisión de la literatura sobre sistemas TIC aplicados a los procesos de transporte. En la sección 3, se describe el método seguido para la simulación del caso de estudio. En la sección 4, se presentan los resultados obtenidos de la simulación y los resultados del test ANOVA.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

El transporte de mercancías tiene un protagonismo creciente dentro de los procesos logísticos, debido a su importancia dentro de los costes logísticos globales (entre un 25% [6] y un 50% [7]). Los procesos de transporte se caracterizan por una gran complejidad (redes formadas por distintos agentes que requieren coordinación) y una creciente competitividad debida a la globalización de los mercados y a una mayor exigencia de los clientes. En este contexto, los sistemas inteligentes de transporte proporcionan un soporte sustancial a los procesos.

Si bien la adopción de estas tecnologías sigue siendo baja, la penetración de estos sistemas se ha acelerado en los últimos años debido principalmente a la disponibilidad de un mayor número de aplicaciones en el mercado, con unas funcionalidades más amplias y a un coste cada vez menor [10]. En la Tabla 1 se incluyen distintos ejemplos de tecnologías aplicadas a los procesos de transporte con el fin de monitorizar la carga.

Tecnología	Aplicación
WSN, GPS	Trazabilidad y seguimiento de materiales nucleares [11]
Bluetooth	Vínculo entre cabina y cabeza tractora [12]
RFID	Identificación automática en el transporte por ferrocarril [13]
RFID	Trazabilidad de contenedores [14]
WSN	Sistema de trazabilidad para contenedores en puertos [15]
Zigbee	Monitorización de contenedores de carga [16]
WSN	Wireless sensors in agriculture and food industry [17]
RFID	Identificación de contenedores en depósitos [18]
WSN, RFID	Monitorización de fruta en el almacenaje y el transporte [19]
RFID, sensors	Monitorización de alimentos durante el transporte [20]
WSN, RFID	Monitorización de temperatura en el suministro de carne [21]

Tabla 1: Ejemplos de aplicaciones de TIC al transporte

Sin embargo, hay pocos estudios dedicados a analizar el impacto de la adopción de sistemas TIC en los procesos de transporte. Los artículos existentes aplican como principal método de investigación el análisis empírico, mientras que las contribuciones que utilizan modelos analíticos y de simulación son todavía muy escasas [10]. Un ejemplo de este enfoque analítico es el trabajo de Mason y otros [25]. En el mismo, los autores desarrollan un modelo de simulación por eventos discretos de una cadena de suministro multi-producto y analizan el impacto de tener en el transporte una mayor visibilidad sobre el inventario de los almacenes. A través de resultados experimentales, muestran el potencial de estos sistemas para mejorar el nivel de servicio al cliente y la reducción de costes.

El presente artículo responde a la necesidad de analizar el impacto sobre el beneficio derivado de la adopción de sistemas TIC en los procesos de transporte [10]. El análisis se realiza sobre un caso de estudio basado en una red de distribución real de mercancía perecedera. Mientras que, en el caso referido de Mason y otros [25], se analiza el beneficio potencial que proporciona una mayor visibilidad sobre el inventario, en el presente artículo se analiza el impacto de un sistema de transporte con nuevas funcionalidades. En primer lugar, el sistema de transporte calcula de forma dinámica la pérdida de calidad de los productos a partir de la información registrada por una red de sensores distribuida por la carga del camión. En segundo lugar, el sistema proporciona visibilidad sobre solicitudes

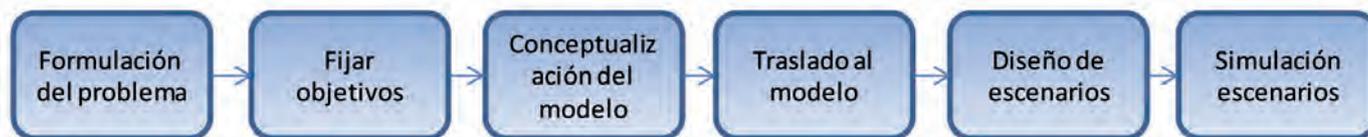


Figura 1: Metodología para el análisis de simulación

de carga de otros proveedores y captura de forma automática el volumen disponible en el camión. En tercer lugar, el sistema analiza mediante modelos matemáticos en cada momento del trayecto cual es la opción de distribución más eficiente entre envío directo y *crossdocking*. En el artículo, se analiza además el impacto de este sistema ante dos alcances geográficos de la red (alcance nacional e internacional) y ante dos niveles de fiabilidad del sistema de control de temperatura del camión. El análisis se realiza por medio de la aplicación de técnicas de simulación a distintos escenarios del caso de estudio y los resultados obtenidos se analizan mediante un test de varianza ANOVA.

3. MÉTODO DE SIMULACIÓN

El uso de modelos de simulación es apropiado para estudiar y experimentar interacciones entre las variables que componen sistemas complejos. La simulación puede definirse como la construcción de modelos que representan sistemas ya existentes o hipotéticos, y la experimentación con dichos modelos para explicar el comportamiento de los sistemas.

Existen diferentes métodos de simulación, pero el más extendido es la *Simulación de Eventos Discretos* [26]. Con esta técnica, el sistema objeto de estudio se modela representando el estado de sus elementos mediante un grupo de variables que cambia a medida que pasa el tiempo de manera discreta. Por sus propias características, la simulación por eventos discretos se adapta muy bien a la naturaleza de los sistemas reales, que usualmente no se prestan a una descripción matemática que contemple todos sus detalles y versatilidad.

Para el análisis de distintos escenarios de simulación, se sigue la metodología [27] definida en la Fig. 1. En los siguientes apartados, se describen las etapas del análisis.

3.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El caso de estudio se basa en una red real de distribución de productos alimentarios, en particular frutas y verduras. La red está formada por 17 proveedores, un centro de distribución y 44 tiendas de tipo hipermercado distribuidas por el Norte de España. La localización del centro de distribución y de las tiendas es conocida pero se desconoce la ubicación de los proveedores. La empresa distribuidora satisface diariamente la demanda de unos 650 tipos de productos, caracterizados por unas dimensiones físicas (que de cara al análisis pueden clasificarse en tres tipos, según su embalaje en caja pequeña, caja mediana y palé) y una temperatura óptima de conservación.

Un operador de transporte hace llegar la mercancía de los proveedores a las tiendas mediante dos opciones de distribución: envío directo a tienda (ver Fig. 2, línea discontinua) o envío a través de un centro de distribución sin almacenamien-

to o *crossdocking* (ver Fig. 2, línea continua). Los vehículos tienen una capacidad establecida y las rutas de reparto a las tiendas desde el centro de distribución son fijas.

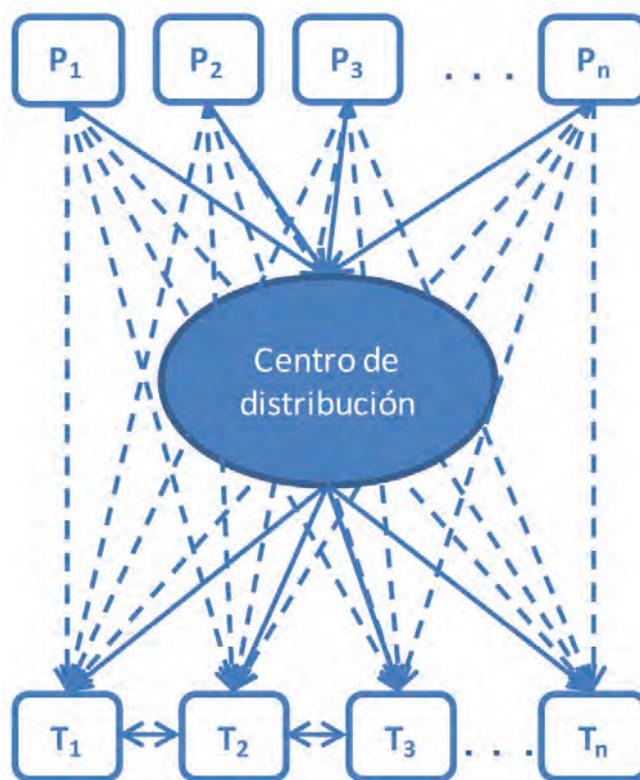


Figura 2: Esquema de los flujos de distribución

3.2. FIJAR OBJETIVOS

El objetivo general del análisis es identificar el impacto derivado de la implantación de un SIT en la flota de transporte. En particular, se persigue analizar el impacto sobre los costes de transporte y sobre el nivel de calidad registrado en los productos al llegar a las tiendas.

3.3. CONCEPTUALIZACIÓN Y TRASLADO AL MODELO

En el caso de estudio, se plantea un sistema inteligente de transporte embarcado en los vehículos de la flota que es capaz de actualizar las rutas durante el trayecto en función de tres variables de decisión: el nivel de calidad de la mercancía transportada, la existencia de nuevas solicitudes de carga por parte de otro proveedor y la opción de distribución más eficiente en cada momento.

Para determinar la pérdida de la calidad de los productos transportados (en adelante, QL), se parte de conceptos y mo-

delos matemáticos planteados en trabajos previos [28]. Generalmente, se considera que la calidad de los productos disminuye durante el transporte cuando la temperatura registrada en la gabarra se desvía de la temperatura óptima de los productos. Asimismo, se considera que los productos transportados no son aptos para la venta cuando la pérdida de calidad de los productos del vehículo supera un umbral (QL_{adm}). En estos casos, el vehículo no continúa su trayecto hasta destino, sino que se dirige al punto de recogida de residuos más cercano.

La toma de decisión para la actualización de la ruta según nuevas solicitudes de carga de otro proveedor (recogida/ no recogida) y para la selección de la opción de distribución más eficiente (envío directo/*crossdocking*) se basa en el coste de transporte para cada una de las opciones según el siguiente modelo de costes:

$$C_{Total} = C_F + C_V + C_P + C_M$$

Donde:

- C_{Total} es el coste total de transporte de la red de distribución.
- C_F es el coste fijo correspondiente a todos los vehículos de la red (coste de personal de conducción, seguros, amortización/alquiler del vehículo).
- C_V es el coste variable correspondiente a todos los vehículos, y depende de la distancia recorrida por cada uno de ellos en el caso de distribución no urbana y del tiempo en el caso de distribución urbana.
- C_P es el coste de parada en instalaciones intermedias (como en las instalaciones de proveedores con nuevas solicitudes de carga) y debido a las operaciones y pérdida de productividad de los vehículos en estos nodos.
- C_M es el coste de manipulación asociado a las operaciones dentro del centro de distribución (recepción, expedición, etc.) y dependiente del número de bultos que intervienen en las operaciones.

El diseño planteado se traslada a un modelo de simulación dinámica por eventos discretos utilizando el software Enterprise Dynamics® 8. En el modelo, los proveedores se han distribuido de forma aleatoria en torno al centro de distribución. La Figura 3 muestra la situación geográfica de la red de distribución y la vista final del modelo.

3.4. DISEÑO DE ESCENARIOS Y SIMULACIÓN

El modelo de simulación se usa para llevar a cabo un análisis de escenarios definidos por cinco factores y dos niveles por factor:

- Visibilidad sobre la pérdida de calidad de los productos durante el transporte (on/off)
- Visibilidad sobre las solicitudes de carga de nuevos proveedores (on/off)
- Selección dinámica de opción de distribución de transporte (on/off)
- Alcance geográfico (Internacional, local)
- Fiabilidad del sistema de control de temperatura (alta, baja)

La visibilidad de la pérdida de calidad de los productos durante el transporte (VCAL) se refiere a la visibilidad que ofrece un SIT instalado en los vehículos de la flota sobre la calidad de los mismos. La visibilidad sobre nuevas solicitudes de carga (VCAR) se refiere a la visibilidad sobre la mercancía lista para expedir de otros proveedores. La selección de la opción de distribución más eficiente (ODIS) se refiere a la disponibilidad de un sistema de análisis integrado en el vehículo que determina durante el trayecto cuál es la opción de menor coste entre *crossdocking* y envío directo. El alcance geográfico (ALGEO) y la fiabilidad del sistema de control de temperatura del vehículo (FIABTEM) se analizan para ver si las dimensiones de la red de distribución y la desviación de la temperatura de la gabarra respecto de la temperatura óptima de los productos afectan de forma significativa al impacto de los factores anteriores. En total, se han simulado 32 escenarios en el modelo de simulación, con diez réplicas de cada uno de ellos.



Figura 3: Situación geográfica de la red de distribución (Fuente: Google Maps) y vista del modelo de simulación

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

En este apartado se analiza el impacto de los factores descritos en el apartado anterior sobre el coste logístico y sobre el servicio ofrecido a las tiendas. El coste logístico se calcula como la suma de costes incurridos en la distribución de la mercancía (transporte y manipulación en el centro de distribución). El servicio se cuantifica en función de la pérdida de calidad de los productos (QL) al llegar a las tiendas. La empresa distribuidora tiene marcado un nivel de calidad objetivo (QL_{obj}). Por encima de este nivel, la calidad de los productos se ve comprometida. Por debajo de este nivel, los recursos dedicados a la conservación de los productos exceden a las necesidades reales. Los resultados asociados a la calidad se

muestran de forma porcentual, respecto a este valor objetivo (QL_{obj}). El nivel de servicio objetivo se corresponderá por tanto con un $\%QL/QL_{obj}$ del 100%.

Los resultados de la simulación de los distintos escenarios se resumen en la Tabla 2.

4.2. ANÁLISIS DEL IMPACTO SOBRE LOS COSTES LOGÍSTICOS

Con objeto de identificar los factores que tienen un impacto mayor en los costes logísticos, se ha realizado un análisis de varianza (ANOVA) utilizando el software estadístico *Minitab*® 14. Los modelos ANOVA son modelos estadísticos cuyo objetivo es averiguar si unos determinados factores incluyen en una variable de interés y, si existe influencia de algún factor, cuantificar dicha influencia. En nuestro análisis,

Escenario	VCAL	VCAR	ODIS	ALGEO	FIABTEM	CostePromedio	CosteDesvEst	% QLProm/ QLObj	% QLDesv/ QLobj
1	On	On	On	Nacional	Alta	21194	1695	93%	15%
2	On	On	On	Nacional	Baja	21190	1476	101%	8%
3	On	On	On	Internac.	Alta	37640	4140	94%	8%
4	On	On	On	Internac	Baja	35520	4262	98%	12%
5	On	On	Off	Nacional	Alta	22320	1562	96%	13%
6	On	On	Off	Nacional	Baja	22260	890	87%	13%
7	On	On	Off	Internac	Alta	39768	3976	98%	15%
8	On	On	Off	Internac	Baja	38480	4232	98%	6%
9	On	Off	On	Nacional	Alta	23884	1433	89%	9%
10	On	Off	On	Nacional	Baja	23908	956	97%	7%
11	On	Off	On	Internac	Alta	42640	5116	91%	7%
12	On	Off	On	Internac	Baja	40592	5276	98%	7%
13	On	Off	Off	Nacional	Alta	24896	1991	85%	6%
14	On	Off	Off	Nacional	Baja	24748	989	94%	14%
15	On	Off	Off	Internac	Alta	45558	2277	91%	8%
16	On	Off	Off	Internac	Baja	45740	3201	97%	5%
17	Off	On	On	Nacional	Alta	22172	1773	96%	8%
18	Off	On	On	Nacional	Baja	22860	1143	104%	6%
19	Off	On	On	Internac	Alta	42720	4699	98%	9%
20	Off	On	On	Internac	Baja	43200	4752	106%	12%
21	Off	On	Off	Nacional	Alta	22680	907	95%	12%
22	Off	On	Off	Nacional	Baja	23200	3016	102%	6%
23	Off	On	Off	Internac	Alta	44080	2644	100%	13%
24	Off	On	Off	Internac	Baja	44816	3137	112%	9%
25	Off	Off	On	Nacional	Alta	24260	1455	90%	15%
26	Off	Off	On	Nacional	Baja	24296	1457	103%	10%
27	Off	Off	On	Internac	Alta	48616	2430	100%	12%
28	Off	Off	On	Internac	Baja	48544	1941	117%	6%
29	Off	Off	Off	Nacional	Alta	25580	3325	96%	7%
30	Off	Off	Off	Nacional	Baja	26268	3414	101%	12%
31	Off	Off	Off	Internac	Alta	49840	2992	100%	12%
32	Off	Off	Off	Internac	Baja	50760	2538	115%	9%

Tabla 2: Resultados experimentales obtenidos de los test de simulación

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		25553	418.4	61.07	0.000
VCAL	-1441	-720	544.3	-1.32	0.234
VCAR	-5378	-2689	544.3	-4.94	0.003
ODIS	-2348	-1174	544.3	-2.16	0.074
FIABTEM	819	410	544.3	0.75	0.480
ALGEO	48660	24330	544.3	44.70	0.000
VCAL*VCAR	162	81	656.5	0.12	0.906
VCAL*ODIS	390	195	656.5	0.30	0.776
VCAL*FIABTEM	-201	-101	656.5	-0.15	0.883
VCAL*ALGEO	-7119	-3560	656.5	-5.42	0.002
VCAR*ODIS	409	205	656.5	0.31	0.766
VCAR*FIABTEM	146	73	656.5	0.11	0.915
VCAR*ALGEO	-6632	-3316	656.5	-5.05	0.002
ODIS*FIABTEM	-562	-281	656.5	-0.43	0.684
ODIS*ALGEO	-460	-230	656.5	-0.35	0.738
FIABTEM*ALGEO	1509	755	656.5	1.15	0.294
VCAL*VCAR*ODIS	-137	-68	656.5	-0.10	0.920
VCAL*VCAR*FIABTEM	-1167	-584	656.5	-0.89	0.408
VCAL*VCAR*ALGEO	401	201	656.5	0.31	0.770
VCAL*ODIS*FIABTEM	-551	-276	656.5	-0.42	0.689
VCAL*ODIS*ALGEO	-3415	-1708	656.5	-2.60	0.041

Tabla 3: Efectos estimados y coeficientes para la variable Costes Media

para identificar los factores significativos se han obtenido tres tipos de resultados: p-valor, gráfico de probabilidad normal de los efectos y gráfico Pareto de los efectos.

El p-valor es un indicador estadístico que da idea de la significancia de una variable. Se consideran significativos aquellos efectos o interacciones de efectos que presentan p-valores

menores que 0.05. En la Tabla 3 pueden apreciarse los resultados del análisis de varianza, en la cual se muestran todas las interacciones hasta las de tercer grado. Se han recuadrado aquellos efectos o interacciones significativas

En el gráfico de probabilidad normal de los efectos, los puntos alejados de la línea de ajuste se corresponden con los efectos más significativos. Los efectos poco significativos suelen estar centrados en el cero. El gráfico Pareto de efectos determina la magnitud y la importancia de un efecto. El gráfico muestra el valor absoluto de los efectos e incluye una línea de referencia. Aquellos factores que atraviesen esta línea son potencialmente importantes (ver ambos gráficos en la Fig.4).

En un análisis de varianza, es importante comprobar que las hipótesis del modelo se verifican para poder sacar conclusiones fiables. Mediante un análisis de los residuos, vemos cómo estas suposiciones (linealidad de los residuos, homocedasticidad, normalidad e independencia) se satisfacen (ver gráficos (1), (2), (3) y (4) respectivamente en Figura 5).

El factor más significativo sobre el coste, al margen del alcance geográfico (término E), es la visibilidad sobre el estado de la mercancía teniendo en cuenta el tamaño de la red (término AE). La reducción de costes se debe a que, ante una degradación de los productos, el vehículo se dirige al punto de recogida de residuos más cercano, sin necesidad de finalizar el trayecto. Este factor apenas resulta significativo de forma independiente (término A), debido a que en la red nacional propuesta el trayecto dura unas horas, y en este intervalo los productos seleccionados no sufren apenas

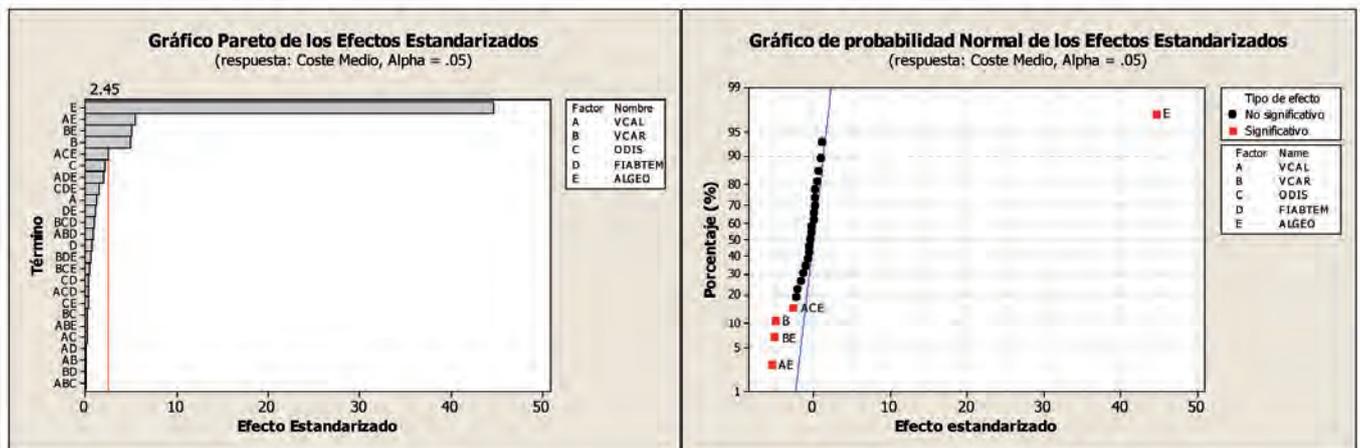


Figura 4: Diagrama de Pareto y Gráfico de Probabilidad Normal

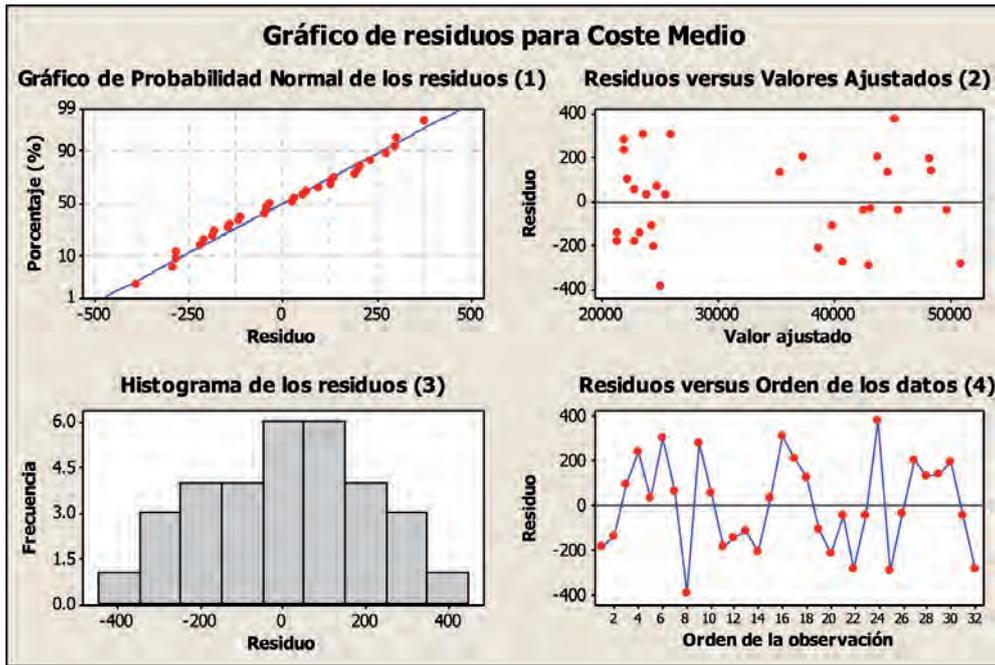


Figura 5: Gráficos de análisis de residuos

degradación. Otra funcionalidad del SIT significativa sobre los costes es la visibilidad sobre las cargas de otros proveedores (término B), que permite la reducción del número de vehículos en el sistema debido a una mayor utilización de la capacidad de los mismos. Su influencia es mayor dado un determinado alcance geográfico de la red (término BE). Cercanos al límite de significancia se encuentran el factor de selección de flujo de distribución (término C), interacciones del mismo (términos ACE y CDE) y la visibilidad sobre la degradación de los productos con dependencia de la fiabilidad del sistema de temperatura del vehículo y según el alcance geográfico de la red de distribución (término ADE).

Para cuantificar los efectos de los factores analizados, se determinan los gráficos de efectos principales y las interacciones de efectos sobre los resultados de coste obtenidos. El gráfico de efectos principales muestra la media de la varia-

ble respuesta (en este caso, los costes logísticos) para los distintos niveles de cada factor. El gráfico de interacciones muestra la media de coste para cada nivel de factor cuando un segundo factor permanece constante. En adelante, el impacto se cuantifica como la diferencia porcentual del coste logístico de un mismo factor para dos niveles distintos.

Del gráfico de efectos principales (primer gráfico de la Figura 6) se deduce que el mayor impacto sobre el coste lo producen la visibilidad sobre las cargas de otros proveedores (impacto del 12% de reducción de costes) y la visibilidad sobre la calidad de la mercancía (impacto del 9%). El impacto de la selección dinámica del flujo logístico es del 5%. En el gráfico de inte-

racción de efectos se observa que el impacto de la visibilidad de la calidad de la mercancía es mayor cuando la red tiene mayores dimensiones (13% de impacto) que cuando es una red nacional (3%). Lo mismo ocurre con la visibilidad de nuevas solicitudes de carga de otros proveedores, que pasa de tener un impacto en reducción de costes del 4% en una red nacional a un impacto del 13% en un ámbito internacional.

4.3. ANÁLISIS DEL IMPACTO SOBRE EL SERVICIO A LAS TIENDAS

En este apartado, se realiza el mismo análisis estadístico que en el apartado anterior, analizando la influencia de los factores sobre el servicio a las tiendas. El servicio proporcionado a las tiendas se valora según el nivel de calidad que registra la mercancía al llegar a las mismas. Los resultados obtenidos del test ANOVA se muestran en la Figura 7.

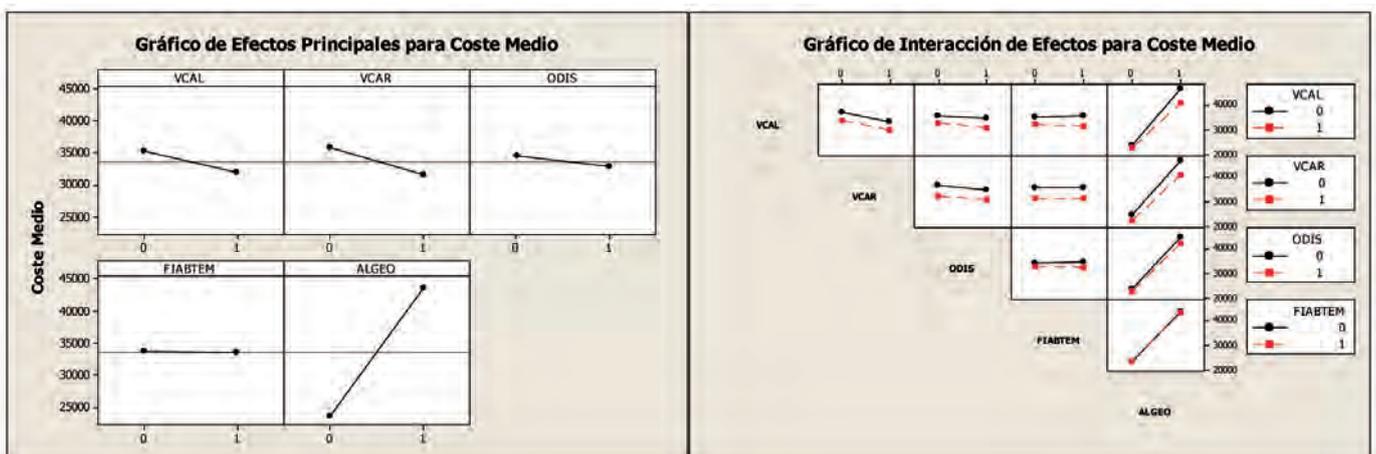


Figura 6: Efectos principales e interacciones de efectos

Del test ANOVA se obtiene que el factor más significativo sobre el servicio a las tiendas es la visibilidad sobre la calidad de los productos transportados (término A en el gráfico (1) y (2) de la Figura 7), con un 8% de impacto (Figura 7, gráfico (3)). Ante la detección de productos degradados, el sistema actualiza la ruta del vehículo para trasladarlos a un punto de recogida de residuos, evitando que dichos productos lleguen en mal estado a las tiendas. La visibilidad sobre la calidad de los productos transportados tiene un mayor impacto sobre el servicio cuando la fiabilidad del sistema de temperatura es baja (11% de impacto, gráfico (4)) que cuando el sistema es fiable (5% de impacto). Análogamente, el impacto sobre el servicio de la visibilidad de la calidad de los productos transportados es mayor con un alcance geográfico mayor (9%) respecto al impacto a nivel nacional (5%), puesto que en trayectos mayores la probabilidad de pérdida de calidad de los productos es mayor.

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Un sistema inteligente de transporte posibilita un flujo de la información en tiempo real entre el vehículo de transporte, el gestor de flota, el punto de origen de la mercancía y el punto de destino. Este flujo de información, compartido y dinámico, favorece una toma de decisiones más eficaz sobre los procesos, redundando en un aumento de la eficiencia logística.

En este artículo, se ha analizado el impacto de un sistema inteligente de transporte con distintas funcionalidades sobre el coste logístico y sobre el servicio proporcionado a las tiendas en un escenario de distribución de mercancía perecedera. A partir de una visibilidad más amplia sobre el estado de los productos y sobre los procesos de otros proveedores, el sistema permite replanificar los procesos de transporte en tiempo real para conseguir la máxima eficiencia. Del análisis se ha obtenido que el mayor impacto sobre el coste logístico se produce cuando el sistema de transporte incorpora funcionalidades que proporcionan visibilidad sobre la calidad de los productos transportados y sobre las solicitudes de carga de otros proveedores, en especial cuando el alcance geográfico de la red es más amplio. El mayor impacto sobre el servicio a las tiendas se produce cuando el sistema inteligente de transporte proporciona visibilidad sobre el nivel de calidad de los productos durante el trayecto. Este impacto es mayor cuando la red de distribución tiene un alcance más amplio y cuando el sistema de control de temperatura tiene menor fiabilidad.

En trabajos futuros podría analizarse el impacto de nuevos factores, como el volumen de demanda de las tiendas (que impactará sobre el número de vehículos en la red) o el número de proveedores en el sistema. También podría ampliarse el alcance analizando el impacto que tendría sobre la red de distribución la implantación de una plataforma colaborativa de integración de información que proporcione una visibilidad mayor de los procesos a los distintos agentes de la cadena de suministro.

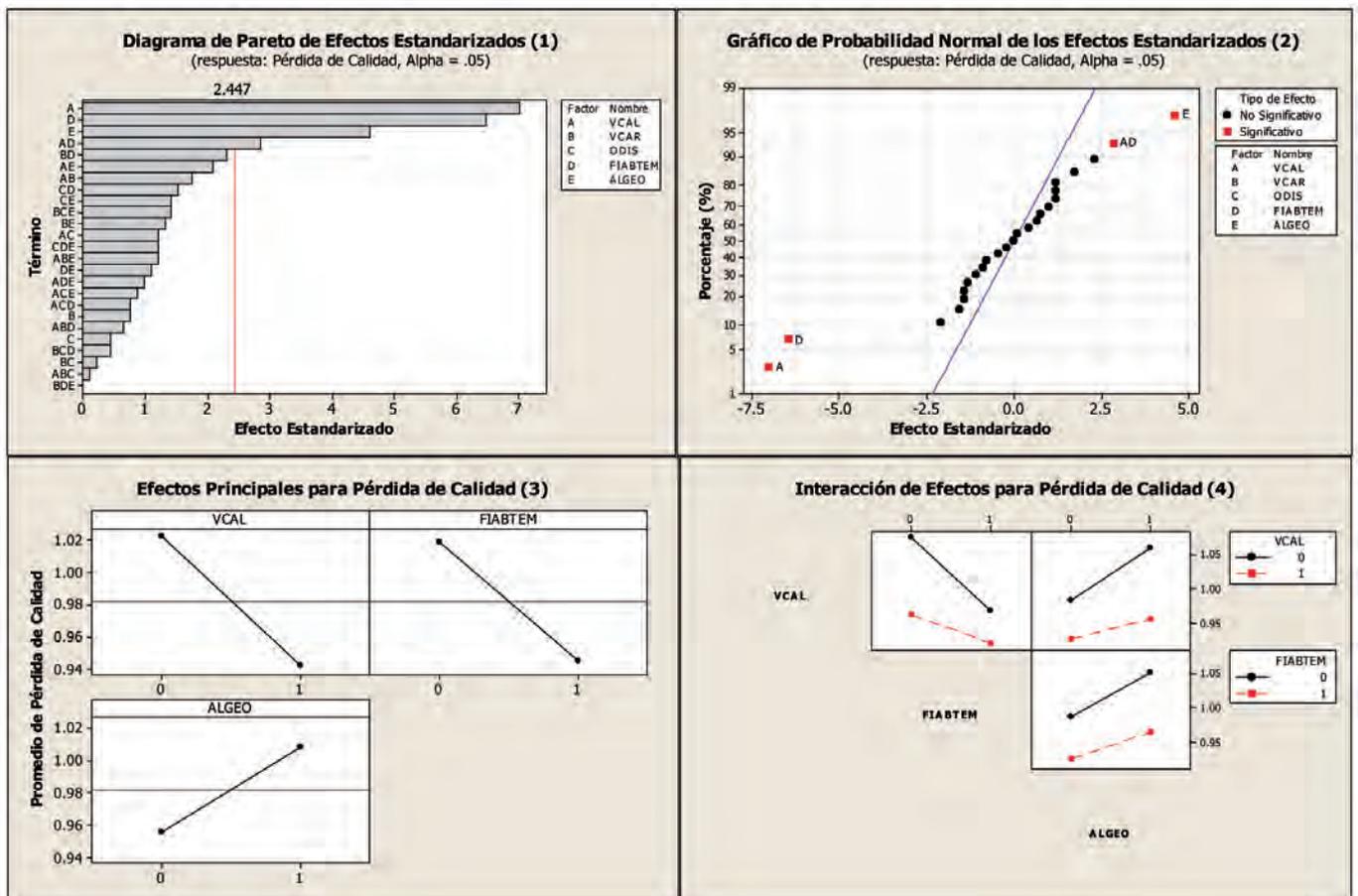


Figura 7: Diagrama de Pareto, Gráfico de Probabilidad Normal, Efectos Principales e Interacciones de Efectos

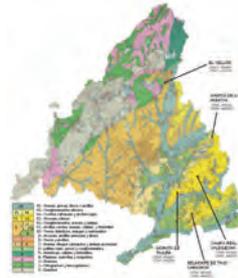
AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo del Grupo de Investigación Aplicada del Instituto Tecnológico de Aragón, del Fondo Europeo de Desarrollo Regional a través del Programa Operativo de Cooperación Territorial España-Francia-Andorra 2007-2013 (EFA194/11) y del Ministerio de Industria, Energía y Turismo de España a través del PLAN AVANZA (TSI-020302-2010-80).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Crainic G, Gendreau M, Potvin J. "Intelligent freight-transportation systems: Assessment and the contribution of operations research". *Transportation Research Part C*. 2008, Vol.17 p.541-557. (doi:10.1016/j.trc.2008.07.002)
- [2] Ruiz-García L, Barreiro P, Rodríguez-Bermejo J, et al. "Review. Monitoring the intermodal, refrigerated transport of fruit using sensor networks". *Spanish Journal of Agricultural Research*. 2007, Vol. 5(2) p.142-156. ISSN: 1695-971-X
- [3] Ichoua S, Gendreau M, Potvin J. "Planned route optimization for real-time vehicle routing". *Dynamic fleet Management: Concepts, Systems & Case Studies*. New York: Springer. 2007, Vol.38 p 1-18. (doi:10.1007/978-0-387-71722-7_1)
- [4] Potvin J, Xu Y, Behyahia I. "Vehicle routing and scheduling with dynamic travel times". *Computers & Operations Research*. 2004, Vol. 33 p. 1129-1137. (doi:10.1016/j.cor.2004.09.015)
- [5] Topaloglu H. "A parallelizable dynamic fleet management model with random travel times" *European Journal of Operational Research*. 2005, Vol. 175 p. 782-805. (doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2005.06.024)
- [6] Lancioni R, Smith M, Oliva T. "The role of internet in supply chain management". *Industrial Marketing Management*. 2000, Vol. 29 p.45-56. (PII S0019-8501(99)00111-X)
- [7] Swenseth S, Godfrey M. "Incorporating transportation costs into inventory replenishment decisions". *International Journal of Production Economics*.2002, Vol. 77 p.113-30. (PII: S 0 9 2 5 - 5 2 7 3 (0 1) 0 0 2 3 0 - 4)
- [8] Wootton JR, García-Ortiz A, Amin SM. "Intelligent transportation systems: a global perspective". *Mathematical and Computer Modelling*. 1995, Vol. 22 p 259-268. (08957177(95)00137-9)
- [9] García-Ortiz A, Amin SM, Wootton, JR. "Intelligent transportation systems: enabling technologies".*Mathematical and Computer Modelling*. 1995, Vol. 22 Nos 4-7 p.11-81. (0895-7177(95)00127-1)
- [10] Perego A, Perotti S, Mangiaracina R. "ICT for logistics and freight transportation: a literature review and research agenda". *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. 2011 Vol. 41 p.457- 483. (doi: http://dx.doi.org/10.1108/09600031111138826)
- [11] Schoeneman JL, Smartt HA, Hofer D. "WIPP transparency project- container tracking and monitoring demonstration using authentication tracking and monitoring systems (ATMS)". 2000, Presented at the Waste Management Conference (WM2k), Tucson, Arizona. Available in www.osti.gov [13 Mar, 2013].
- [12] Gunnarsson M. "Truck-trailer wireless connection". 2001, Master's thesis project. Royal Institute of Technology, Sweden, 56 pp. Available www.imit.kth.se [13 Mar, 2013].
- [13] "TRANSCORE. Electronic container seals field operational test project". Task # 2. Technology Review Report. Northwest International Trade Corridor Program. September 15, 2003. Available in <http://depts.washington.edu/trac/tracuw/freight/> [13 Mar, 2013].
- [14] Karkkainen M. "Increasing efficiency in the supply chain for short life goods using RFID tagging".*International Journal of Retail & Distribution Management*. 2003,Vol. 31, p529-536. (doi: http://dx.doi.org/10.1108/09590550310497058)
- [15] Callaway, EH. "Wireless sensor networks: architectures and protocols". Auerbach Publications, USA. 2004, p342. Available in: <http://www.crcnetbase.com/doi/pdfplus/10.1201/9780203500705.fmatt> [13 Mar, 2013].
- [16] Fuhr P, Lau R. "Mesh radio network performance in cargo containers". 2005, *Sensors Magazine Online*. Available in <http://www.sensorsmag.com/aerospace-military-hs/homeland-security/mesh-radio-network-performance-cargo-containers-634> [13 Mar, 2013].
- [17] Wang N, Zhang N, Wang M. "Wireless sensors in agriculture and food industry—Recent development and future perspective". *Computers and Electronics in Agriculture*. 2006 Vol. 50 p1-14.(doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2005.09.003>)
- [18] Ngai EWT, Cheng TCE, Au S, et al. "Mobile commerce integrated with RFID technology in a container depot". *Decision Support Systems*. 2007 Vol. 43(1) p62-76. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dss.2005.05.006>)
- [19] Ruiz-García L, Barreiro P,Ruiz-Altisent M. "Sistemas de Control en el Transporte de productos Perecederos". In: I Reunión Científico-Técnica Frutera. Detección de problemas asociados a la calidad: frutas y hortalizas , Septiembre 2009, Sao Paulo, Brasil.
- [20] Wang L, Kwok SK, Ip WH. "A radio frequency identification and sensor-based system for the transportation of food" *Journal of Food Engineering*. 2010, Vol.101 p120-129. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.06.020>)
- [21] Raab V, Petersen B, Kreyenschmidt J. "Temperature monitoring in meat supply chains". *British Food Journal*. 2011 Vol.113 No.10 p. 1267-1289. (doi: <http://dx.doi.org/10.1108/00070701111177683>)
- [22] Golob TF, Regan AC."Trucking industry adoption of information technology: a structural multivariate probit model". *Transportation Research Part C*. 2002 Vol.10 p.205-228. (PII: S0968-090X(02) 00006-2)
- [23] Karacapilidis N, Lazanas A, Megalokonomos G, et al."On the development of a web-based system for transportation services". *Information Sciences*. 2006 Vol.176 p.1801-1828. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2005.05.007>)
- [24] Kia M, Shayan E, Ghotb F. "The importance of information technology in port terminal operations".*International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. 2000 Vol.30 Nos 3/4 p.331-44. (MCB University Press, 0960-0035)
- [25] Mason SJ, Ribera PM, Farris JA, et al. "Integrating the warehousing and transportation functions of the supply chain". *Transportation Research Part E*. 2003 Vol.39 p.141-59. (PII: S1366-5545(02)00043-1)
- [26] Jahangirian M, Eldabi T, Naseer A, et al. "Simulation in manufacturing and business: A review". *European Journal of Operational Research*. 2010 Vol.203 p.1-13. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2009.06.004>)
- [27] Banks J, Gibson R. "Simulating in the Real World". *IIE Solutions*. 2001 Vol.33,4 p38.
- [28] Sloof M, Tijskens LMM, Wilkinson EC."Concepts for modeling the quality of perishable products". *Trends in Food Science and Technology*. May 1996 Vol7, p165-171. (PII-S0924-2244(96)30007-1)

Introducción de criterios de sostenibilidad en la elección de emplazamientos industriales mediante modelos multicriterio



INTRODUCTION OF SUSTAINABILITY CRITERIA IN THE SELECTION OF INDUSTRIAL LOCATIONS THROUGH MULTICRITERIA MODELS

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5853> | Recibido: 28/05/2013 • Aceptado: 11/12/2013

Juan Pedro Luna-González¹,
 M^o Encarnación Rodríguez-Hurtado²

¹ COMUNIDAD DE MADRID. Dirección General de Industria, Energía y Minas. Calle Cardenal Marcelo Spínola, 14 - 28016 Madrid. Tfno: +34 915 802177. juan.luna@madrid.org

² UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. Departamento de Química Industrial y del Medio Ambiente. Calle José Gutiérrez Abascal 2, 28006 - Madrid. Tfno: +34 913 363188 erodriguez@etsii.upm.es

ABSTRACT

• The choice of locations for the implementation of industrial activities is a complex problem where the cost and efficiency criteria have been adding new ones relating to the environment impact and the company's corporate image reflected in Corporate Social Responsibility.

The environmental criteria have been getting big importance in the final decision, to become key elements in the final decision, due to the duty of submit of environmental assessment projects. Therefore, promoters, quite often, ask previously to the Administration about the viability of their projects before starting a lengthy administrative procedure.

This paper proposes the use of sustainability indicators and their application through a multi-criteria decision model for managing the establishment options initially considered, so that they become an help instrument of estimation in order to making these decisions. To show its usefulness we propose the use of the support tool for decision making based on the PROMETHEE methodology and its application in the management of 5 alternative sites for the installation of a cement factory in the Community of Madrid under sustainability criteria.

• **Keywords:** Industrial Establishment, indicators, sustainable development, localization, multicriteria.

RESUMEN

La elección de localizaciones para la implantación de actividades industriales es un problema complejo, donde a los criterios de coste y eficiencia se han ido añadiendo otros nuevos relativos tanto al impacto en el medio ambiente como a la imagen de la empresa reflejada en la Responsabilidad Social Empresarial.

Los criterios medioambientales han ido adquiriendo gran relevancia en la decisión final, hasta convertirse, gracias a la obligación de someter los proyectos a evaluación ambiental, en elementos clave en la decisión final.

Por ello, resulta relativamente frecuente que los promotores consulten previamente con la Administración sobre la viabilidad de sus proyectos antes de iniciar un dilatado procedimiento administrativo.

En este trabajo se plantea la utilización de indicadores de sostenibilidad y su aplicación, a través de un modelo de decisiones multicriterio, para la ordenación de las distintas opciones de ubicación inicialmente consideradas, de tal forma que se conviertan en instrumento de tanteo y ayuda en la toma de estas decisiones. Para mostrar su utilidad se propone la utilización de la herramienta de apoyo basada en la metodología PROMETHEE y su aplicación en la ordenación de cinco emplazamientos alternativos para la instalación de una cementera en la Comunidad de Madrid según criterios de sostenibilidad.

Palabras clave: Establecimiento Industrial, indicadores, desarrollo sostenible, localización, multicriterio.

1. INTRODUCCIÓN

La toma de decisiones estratégicas en una empresa, como la implantación o ampliación de instalaciones industriales, ha sido tradicionalmente una cuestión compleja y vinculada a diversos factores entre los que destacan el coste y la eficiencia.

Las primeras teorías que abordaron el problema de la localización industrial, en base a estos dos objetivos, se originaron durante el siglo XIX y principios del XX. La evolución de las distintas metodologías en este campo han ido orientadas desde los inicios a la búsqueda de la minimización de costes tanto los correspondientes al transporte de materias primas como los relativos al resto de factores productivos (capital y trabajo) y los ligados a la comercialización de sus productos [1] [2].

Entre estos trabajos cabe destacar el modelo conocido como "Teoría de los Lugares Centrales", propuesto inicialmente por Christaller en 1933 y completado, posteriormente, por Lösch

en 1954 y Ghosh en 1986. En este modelo la localización empresarial, en general, se realizaría en el denominado lugar central para abastecer a la mayor población posible distribuida por todo el territorio circundante [3].

Actualmente, la decisión sobre localización de nuevos establecimientos industriales sigue siendo una problema estratégico para las empresas al no existir una solución universal sino múltiples, dependiendo del punto de vista de la disciplina desde donde se planteen (matemática, geográfica, económica, sociológica, psicológica, ingenieril).

A la complejidad inherente a la elección del emplazamiento más adecuado también se ha unido una mayor sensibilización ambiental que, en los últimos treinta años, ha propiciado importantes transformaciones en los planteamientos empresariales al establecer una conexión entre su objetivo de rendimiento económico y la protección del medio ambiente. La evolución de este nuevo planteamiento ha dado lugar a un nuevo enfoque donde el objetivo de generar valor se plantea en reconciliación con otros objetivos económicos, sociales y medioambientales en la llamada *Responsabilidad Social Empresarial (RSE)* [4].

En este cambio de enfoque, la sensibilidad hacia el entorno se ha visto reforzado por otros criterios de oportunidad sociopolítica, a los que se ha unido una estricta legislación enfocada a la minimización de impactos ambientales.

Esta legislación se basa en los Estudios de Impacto Ambiental como instrumento para garantizar la preservación del medioambiente de manera que las Administraciones Públicas se pronuncian sobre la idoneidad de la implantación de determinadas instalaciones industriales a través de la Declaración de Impacto Ambiental. Este procedimiento está regulado en España mediante Ley 21/2013, de 9 de diciembre [5] y las comunidades autónomas, a su vez, cuentan en la mayoría de los casos con su desarrollo específico.

No obstante, a pesar de tratarse de un procedimiento reglado, en la elaboración de los Estudios de Impacto Ambiental, existe cierto grado de libertad que ha permitido que, a lo largo del tiempo, se hayan desarrollado numerosas metodologías, influenciadas en su mayoría por proyectos específicos. Sin embargo, ninguna de ellas se considera óptima para satisfacer las necesidades de todo tipo de proyectos y actuaciones [6].

Además, en el caso de determinadas instalaciones, entre las que se incluyen algunas actividades industriales muy contaminantes, existe la necesidad de llevar a cabo una efectiva prevención y un control integrado de la contaminación, lo que añade un requisito adicional para su construcción, montaje, modificación sustancial, explotación o traslado. En la Unión Europea este requisito se conoce como Autorización Ambiental Integrada. A estos efectos, en todos los Estados Miembro se ha desarrollado un importante cuerpo legislativo en consonancia con la Directiva 96/61/CE, del Consejo, de 24 de septiembre [7], que en España se ha traspuesto mediante la Ley 16/2002, de 1 de julio¹ [8].

En cualquier caso, tanto si es necesaria una Declaración

de Impacto Ambiental, como si se necesita una Autorización Ambiental Integrada, en un buen número de ocasiones se precisa someter la decisión de emplazamiento a un proceso que puede resultar heterogéneo, complejo y dilatado en el tiempo (varios años) teniendo que añadir además la incertidumbre del resultado.

No obstante, ante la gran incógnita sobre la viabilidad de la localización de una nueva instalación industrial entre varias posibles, en numerosas ocasiones se consulta con las autoridades, la opinión sobre las diferentes alternativas, si bien cualquier valoración previa no está exenta de subjetividad si no se apoya en instrumentos objetivos.

En el trabajo presentado no se plantea una alternativa a los Estudios de Impacto Ambiental, ampliamente admitidos por su incuestionable eficacia, sino que se propone la introducción de otros instrumentos previos y complementarios que, sobre la base de la sostenibilidad, permitan obtener una primera valoración de las posibilidades de éxito de cada alternativa, a través de un número limitado de indicadores que reflejen los aspectos más relevantes de la actividad mediante el empleo de herramientas de ayuda a la toma de decisiones multicriterio.

Esta nueva vía de exploración y tanteo previo podrá resultar de gran utilidad tanto al promotor como a las autoridades, para disponer de una primera valoración sobre la idoneidad de las distintas opciones y además abre la posibilidad de combinarlas introduciendo aspectos de carácter económico y social adicionales a los ambientales de gran interés para el desarrollo de políticas públicas de equilibrio territorial.

2. HERRAMIENTAS DE APOYO A LA TOMA DE DECISIONES

La necesidad de optimizar la elección entre distintas opciones ha contribuido a la búsqueda de metodologías de apoyo a la toma de decisiones complejas en escenarios donde se combinan múltiples, e incluso contradictorios, criterios de selección. En las últimas décadas se han desarrollado un gran número de métodos para la toma de decisión multicriterio que resultan de gran interés por su aplicación práctica en muchos campos [9].

Uno de los campos de aplicación es la elección del emplazamiento más sostenible para una actividad, donde los criterios de sostenibilidad estén representados por indicadores de caracterización territorial mientras que, la existencia de indicadores de comportamiento de la actividad va a tener su importancia cualitativa al establecer las preferencias o pesos a asignar sobre los indicadores territoriales asociados a ellos.

Se trata pues de un problema con un número discreto de criterios y alternativas (problema decisional discreto) para cuya solución existen varias metodologías muy conocidas y utilizadas como el método ELECTRE (*Elimination and (et) Choice Translating Algorithm*) [10] o el método PROMETHEE (*Preferente Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*) [11], pertenecientes, ambos, al grupo de métodos de relaciones de superación (*Outranking*), y el Proceso Analítico Jerarquizado AHP (*Analytic Hierarchy Process*) [12], cuya aplicación se ha simplificado gracias a su implementación informática.

¹ Modificada por Ley 5/2013, de 11 de junio (BOE n°140, de 12/06/2013)

En el estudio que se presenta en esta publicación se ha optado por el método PROMETHEE, que proporciona, mediante comparaciones binarias, una ordenación de las alternativas desde la mejor hasta la más débil, con la ventaja, frente al resto de sus competidores de poder establecer, no sólo preferencias entre criterios a través de los pesos asignados, sino también intracriterios a través de las funciones de preferencia, que permiten fijar para cada criterio la escala con la que el decisor puede establecer su variación respecto a valores umbrales (umbral de indiferencia, de preferencia estricta o de relación entre ambos) [13].

En la metodología PROMETHEE se establece no sólo la preferencia de una alternativa sobre otra, sino el grado o intensidad con que es preferida dicha alternativa, lo que da lugar a la consideración de flujos de superación. Estos flujos para cada opción serán positivos (Φ^+) cuando representen la intensidad de su preferencia respecto a las $n-1$ alternativas restantes (fortaleza de la opción) y serán negativos (Φ^-) cuando representen la intensidad con la que otras opciones son preferidas a ella (debilidad de la opción), dando lugar a la ordenación de alternativas según los flujos de preferencia.

Para resolver el ordenamiento se dispone de dos técnicas, PROMETHEE I, que proporciona una ordenación parcial y

PROMETHEE II para obtener una ordenación completa, ambas implementadas en el software *Visual PROMETHEE* (Fig. 1) disponible en <http://www.promethee-gaia.net/software.html>, que incorpora el proceso GAIA consistente en un módulo de interacción visual complementario de esta metodología.

3. METODOLOGÍA Y PLANTEAMIENTO

3.1. METODOLOGÍA

La evaluación de la sostenibilidad es un problema complejo, ya que, al no existir una forma directa de medida, los indicadores se han convertido en los instrumentos más utilizados para su estimación.

Un análisis del enfoque dado a los indicadores utilizados en los distintos sistemas de gestión medioambiental (ISO 14000, EMAS², etc.), sistemas de comportamiento medioambiental y de desarrollo sostenible (UNCDS³, OCDE⁴, Unión Europea, nacionales y regionales, etc.) y los de sostenibilidad empresarial (RSE, memorias de sostenibilidad, etc.) permiten identificar una importante coincidencia de aspectos abordados en todos ellos que puede resumirse en la Tabla 1.

Escenario1	Des. Materiales	línea eléctrica	tend. hídrica	NO3	Partículas	SO3	Dist. zona pr...	n Especies	Recep. Eco.	Sensib. Empl
Unidad	km	km	coef. correl.	por uno	por uno	por uno	m	unit/km2	tasa	por uno
Preferencias										
Min/Max	min	min	max	max	max	max	max	min	max	max
Peso	1,39	1,39	1,12	0,68	0,68	0,41	3,19	4,51	0,30	0,58
F. de Preferencia	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
Umbrales	absoluto	absoluto	absoluto	absoluto	absoluto	absoluto	absoluto	absoluto	absoluto	absoluto
- Q: Indiferencia	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- P: Preferencia	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- S: Gaussiano	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Estadísticas										
Mínimo	10,123	0,00	-0,791	0,240	0,350	0,620	435,00	13,00	0,33	1,56
Máximo	19,305	15,00	-0,106	0,550	0,470	0,780	2100,00	37,00	17,48	2,21
Media	13,185	8,80	-0,270	0,426	0,386	0,734	887,80	19,40	5,84	1,87
Desv. est.	3,290	6,49	0,262	0,107	0,045	0,058	625,66	8,96	6,38	0,25
Evaluaciones										
El Yellón	19,305	15,00	-0,106	0,510	0,470	0,760	524,00	37,00	3,45	1,64
Santos de la Hu...	13,775	2,00	-0,791	0,240	0,350	0,620	435,00	13,00	0,33	1,56
Morata de Tajuña	10,983	0,00	-0,110	0,400	0,370	0,760	500,00	18,00	17,48	2,06
Campo Real-Vald...	11,741	12,00	-0,161	0,430	0,390	0,750	2100,00	15,00	7,50	1,86
Belmonte de Taj...	10,123	15,00	-0,180	0,550	0,350	0,780	880,00	14,00	0,43	2,21

Figura 1: Interface de la herramienta Visual PROMETHEE. Fuente: Elaboración propia

² Eco-Management and Audit Scheme

³ United Nations Commission on Sustainable Development

⁴ Organisation for Economic Co-operation and Development

Dimensión medioambiental	Dimensión económica	Dimensión social
<ul style="list-style-type: none"> • Demanda de recursos • Descargas contaminantes • Impactos 	<ul style="list-style-type: none"> • Desempeño empresarial • Relación económica con el entorno • Ecoeficiencia 	<ul style="list-style-type: none"> • Relación humana • Relación laboral • Relación social

Tabla 1: Relación de aspectos sobre los que se agrupan los indicadores de sostenibilidad. Fuente: Elaboración propia

A partir de esta coincidencia de aspectos, se pueden abordar otros planteamientos en donde los indicadores se desarrollen bajo un nuevo modelo conceptual según se refieran al comportamiento empresarial independientemente del entorno en donde se desarrolla la actividad, la interrelación que se produce entre entorno y actividad o exclusivamente al entorno donde se producen los impactos (Fig. 2).

y el 17,9 del PIB⁵), a las que hay que sumar una gran protección territorial.

Para su solución se han considerado indicadores basados en RSE asociados a un proceso productivo equivalente y a las capacidades territoriales de los emplazamientos preseleccionados y éstos se han procesado con la herramienta de ordenación de opciones PROMETHEE.

3.2.1. El proceso productivo

El proceso productivo para la fabricación del cemento comienza con la extracción, por métodos convencionales a cielo abierto de la caliza, y en menor medida arcilla que tras las etapas de homogeneización, mezcla en proporciones adecuadas y molido con un alto grado de finura, se calcina a 1.450°C para obtener *clinker*.

El *clinker*, una vez enfriado, es la materia base a la que se adicionan otras materias primas, como el yeso (para regular el fraguado) y otros compuestos para la obtención del cemento Portland. La utilización de otros materiales como caliza, cenizas volantes, puzolanas, etc. permite conseguir las distintas calidades requeridas según los usos del cemento (Fig. 3).



Figura 2: Estructura del modelo de indicadores para el análisis de emplazamientos según su función. Fuente: Elaboración propia

3.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El objetivo de este trabajo es evaluar mediante criterios de sostenibilidad la decisión de localizar una nueva cementera de características equivalentes a una de las líneas de fabricación de cemento gris con que cuenta *Cementos Portland Valderrivas* en la fábrica de El Alto en Morata de Tajuña en Madrid, en cinco emplazamientos diferentes de la *Comunidad de Madrid*.

La particularidad de este caso deriva de la combinación de una actividad como la cementera, generadora de importantes impactos ambientales y del interés económico de atender un mercado como el de la Comunidad de Madrid con grandes posibilidades de expansión urbanística y de infraestructuras, y con unas características territoriales muy singulares en el conjunto nacional (1,6% del territorio, 18,72% de la población

3.2.2. Preselección de emplazamientos

Dado que la proximidad de materias primas para la fabricación del cemento es un factor clave de competitividad, por la importancia del transporte en los costes de producción, la litología de la Comunidad de Madrid, perfectamente conocida con importantes yacimientos de calizas, arcillas y yesos, va a condicionar la preselección de los 5 emplazamientos a comparar desde la perspectiva de la sostenibilidad (Fig. 4).

3.2.3. Criterios de sostenibilidad

Los criterios de sostenibilidad pueden representarse por indicadores tanto de comportamiento como de situación terri-

⁵ Producto Interior Bruto

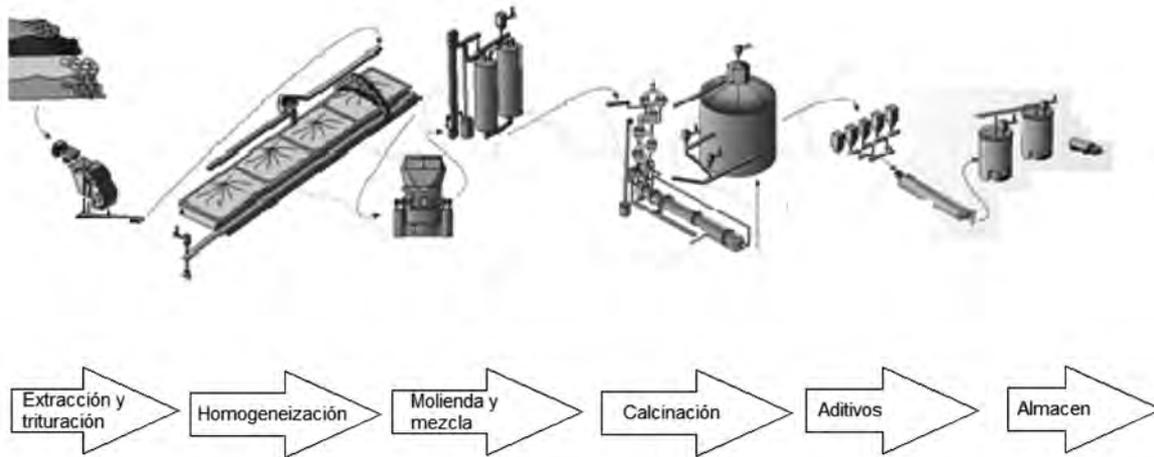


Figura 3: Esquema de producción de cemento.

Fuente: Elaboración propia a partir de Declaración Ambiental de Fabrica Cementos Portland "El Alto" [15]

torial. Los primeros no tendrán una aplicación directa en el problema, pero servirán para seleccionar y asignar la importancia de los segundos que constituyen los auténticos criterios para la comparación de opciones.

3.2.3.1. Evaluación del comportamiento

Los indicadores de comportamiento empresarial están ampliamente tratados en numerosas metodologías. Así, las *Declaraciones medioambientales* presentadas de acuerdo al Reglamento EMAS [17] proporcionan una importante información medioambiental de la actividad a evaluar, mientras que las *Memorias de sostenibilidad* publicadas siguiendo la metodología GRI [18] además de complementar estos aspectos ambientales proporcionan información social y económica de interés. Ambas metodologías, aplicadas por el Grupo Cementos Portland, han servido de base para determinar las magnitudes fundamentales de la actividad a evaluar, teniendo en cuenta su capacidad de producción respecto a la de la fábrica de El Alto (Tabla 2).

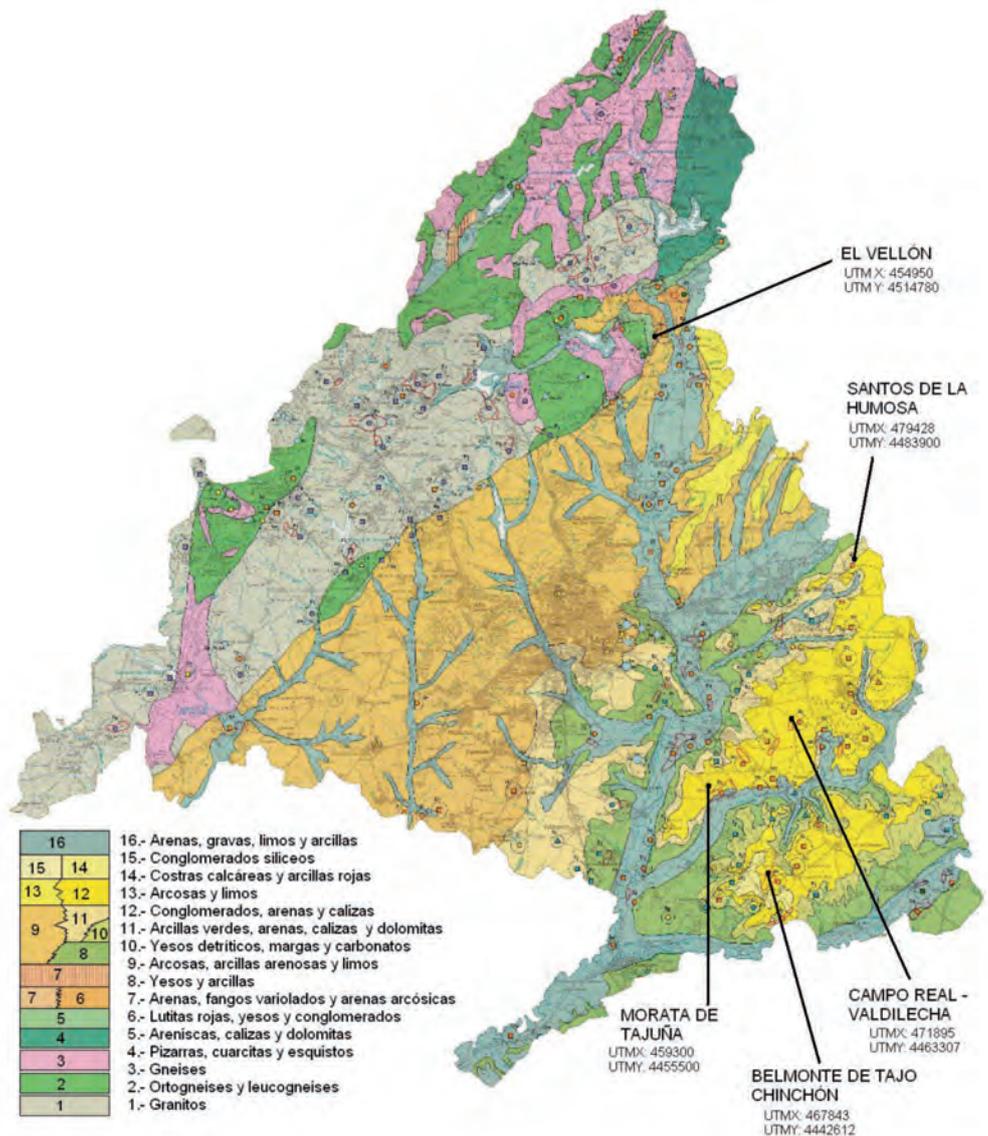


Figura 4: Litología de la Comunidad de Madrid y localización de emplazamientos para estudio de localización de cementera. Fuente: Elaboración propia sobre cartografía de rocas industriales del Instituto Geológico y Minero de España (IGME)

Aspecto	Indicador	Por línea	Unidades	Relevancia
Materiales	Caliza	642.887,5	t	alta
	Arcilla	64.518,5		
	Yeso	18.280		
Energía	Coque de petróleo	33.538,9	t	alta dentro del conjunto de materiales
	Electricidad (MWh)	45141,7	MWh	alta
Agua	Captación	78.747	m ³	alta
	Reciclada	23957,2		
Emisiones	NO _x	616.879,5	kg	alta
	SO ₂	5.589		moderada
	Partículas	16.353,5		alta
VEG ¹	Ingresos	49,38	M€	alta
VED ²	Costes operativos	29,90		alta
	Salarios y beneficios sociales para los empleados	10,06		
Empleo	Nº de empleados	61	Empleos	alta

Tabla 2: Resumen de las principales magnitudes asignables a una línea de cemento gris. Fuente: Estimación a partir de Declaración Ambiental fábrica Cementos Portland "El Alto" y Memoria de Sostenibilidad del año 2011 [15 y 16].

El análisis de los indicadores de comportamiento permite realizar la selección de aspectos que van a tener una mayor importancia en la relación entre actividad y territorio, tal como se indica en la Tabla 2. Así, a la relevancia del transporte de materiales, por su impacto en los costes, se añaden otros desde la sostenibilidad como los que resultan de la gran demanda de energía eléctrica que exige el tendido de líneas eléctricas o la demanda de agua que tiene su efecto en el comportamiento del acuífero del que se alimenta mientras que, las emisiones atmosféricas influirán en los niveles de inmisión de los distintos contaminantes presentes en la zona.

En el ámbito económico-social destaca el importante efecto beneficioso que puede provocar una actividad de esta naturaleza en términos de reparto de riqueza y creación de empleo.

A estos aspectos de apreciación directa hay que añadir la importancia que se viene prestando últimamente en las evaluaciones ambientales a la preservación de espacios naturales y especies protegidas ya que son responsables de numerosas Declaraciones de Impacto Ambiental desfavorables.

En la selección de criterios se han tenido en cuenta, únicamente, aquellos indicadores relativos a aspectos en los que el comportamiento de la actividad tiene relevancia

3.2.3.2. Evaluación territorial

Una vez seleccionados los aspectos sobre los que la actividad va a tener una mayor relevancia, se ha realizado la

selección de indicadores de caracterización del emplazamiento asociados a dichos aspectos.

- 1. Transporte medio del aprovisionamiento de materiales y combustibles:** relacionado con el indicador de mercancías transportadas por distancia recorrida muy frecuente en el transporte [19]. Se calcula como el cociente entre la suma para todas las operaciones de transporte, del producto de las cargas (M_i) (t) transportadas por la distancia (d_i) (km) recorrida y la totalidad de las cargas transportadas (1).

$$DMA = \frac{\sum_i M_i \times d_i}{\sum_i M_i} \quad (1)$$

- 2. Longitud del tendido eléctrico:** definido como la suma de las longitudes de las líneas eléctricas necesarias (d_k) hasta enlazar con el nodo de red de distribución más cercano capaz de proporcionar la potencia necesaria (2).

$$RIE = \sum_{k=1}^n d_k \quad (2)$$

3. **Propensión hídrica local (PHL):** definido como la evolución del piezómetro, al menos durante los 10 últimos años, correspondiente al acuífero subterráneo más próximo. Se calcula como el coeficiente de correlación lineal de los niveles piezométricos (p) con el tiempo (t). Esto es, el cociente entre la covarianza de ambos valores y el producto de sus respectivas desviaciones típicas (s_p para los valores piezométricos y s_t para el tiempo) (3).

$$PHL = \frac{Cov(p,t)}{s_p s_t} \quad (3)$$

4. **Capacidad de acogida del territorio para cada contaminante (CA_i):** obtenido como la diferencia entre el valor límite legal para el contaminante (VL_i) y el valor medio, generalmente anual, que proporcionen las estadísticas oficiales (VM_i) [14] (4).

$$CA_i = 1 - \frac{VM_i}{VL_i} \quad (4)$$

5. **Distancia a zonas protegidas:** obtenido como la mínima distancia a zona protegida (mdp) en línea recta. Tendrá signo negativo si las instalaciones son interiores a la zona protegida y positivo si es exterior (5).

$$mdp = \min \{d_i\} \quad (5)$$

6. **Densidad de especies protegidas:** establecido como el número de especies en peligro de extinción (PE), interés especial (IE), sensibles a la alteración de su hábitat (SH) y vulnerables (EV) (Fig. 5) en la zona de la instalación (6).

$$EP = PE + IE + SH + EV \quad (6)$$

Este indicador deriva del impacto conjunto que puede generar en el hábitat de muchas especies la actividad humana y se incluye por su fuerte influencia en la mayor parte de las evaluaciones de impacto.

7. **Receptividad económica local:** representado a través de la tasa de crecimiento real de PIB con signo negativo (TC). Se obtiene como la diferencia con la unidad del cociente entre los dos valores de PIB real correspondientes al período más reciente (PIB_1) y el anterior (PIB_0), expresada en porcentaje (7).

$$TC = \left(1 - \frac{PIB_1}{PIB_0}\right) \times 100 \quad (7)$$

8. **Sensibilidad local al empleo (SLE):** definido como la relación de la tasa local de paro local (TDL) y la

situación ideal del pleno empleo (TDPE) establecida por convenio en el 5% (8).

$$SLE = \frac{TDL}{TDPE} - 1 \quad (8)$$

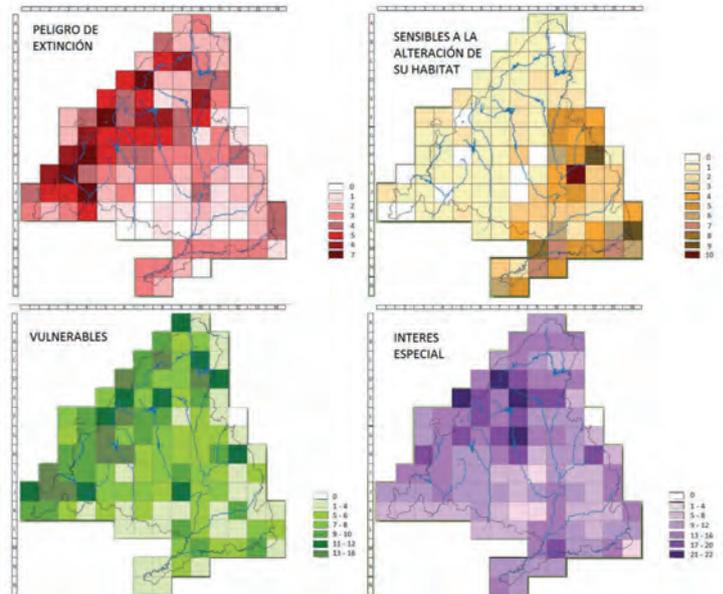


Figura 5: Distribución de especies de la categoría de peligro de extinción, sensibles a la alteración de su hábitat, vulnerables y de interés especial. Fuente: Atlas. El medio Ambiente en la Comunidad de Madrid [20]

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez elegidos los indicadores representativos, la elección de los pesos (W) es la etapa más delicada del método por su complejidad, especialmente al incrementar el número de criterios.

Para superar la dificultad que supone la asignación objetiva de pesos, resulta de gran utilidad el método AHP [12] en el que los pesos de los diferentes criterios los asigna el decisor, mediante el establecimiento de juicios de valor a través de la denominada “escala numérica de Saaty” (de 1 al 9) (Tabla 3).

Escala Numérica	Resultados de la comparación de criterios
1	Los dos criterios que se comparan tienen idéntica importancia
3	El criterio que se considera es moderadamente más importante que el otro
5	El criterio que se considera es bastante más importante que el otro
7	El criterio que se considera es mucho más importante que el otro
9	Un elemento tiene una importancia extremadamente alta frente al otro

Tabla 3: Escala de comparativa de parejas según el método de Saaty [12]

Criterios		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	W	Objetivo
Transporte de materiales y combustibles	(1)	1,00	1,00	3,00	3,00	3,00	5,00	0,33	0,20	3,00	1,00	1,39	Minimizar
Longitud del tendido eléctrico	(2)	1,00	1,00	3,00	3,00	3,00	5,00	0,33	0,20	3,00	1,00	1,39	Minimizar
Propensión hídrica local	(3)	0,33	0,33	1,00	3,00	3,00	5,00	0,20	0,20	5,00	3,00	1,12	Maximizar
(*) Capacidad de acogida para NO ₂	(4)	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	3,00	0,14	0,14	3,00	3,00	0,68	Maximizar
(*) Capacidad de acogida para partículas	(5)	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	3,00	0,14	0,14	3,00	3,00	0,68	Maximizar
(*) Capacidad de acogida para SO ₂	(6)	0,20	0,20	0,20	0,33	0,33	1,00	0,14	0,11	3,00	3,00	0,41	Maximizar
Distancia a zona protegida	(7)	3,00	3,00	5,00	7,00	7,00	7,00	1,00	0,33	7,00	3,00	3,19	Maximizar
Densidad de especies	(8)	5,00	5,00	5,00	7,00	7,00	9,00	3,00	1,00	7,00	3,00	4,51	Minimizar
Receptividad económica	(9)	0,33	0,33	0,20	0,33	0,33	0,33	0,14	0,14	1,00	0,33	0,30	Maximizar
Sensibilidad al desempleo	(10)	1,00	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	3,00	1,00	0,58	Maximizar

Tabla 4: Asignación de pesos según metodología Saaty. Fuente: Elaboración propia. (*) Referidos al medio ambiente atmosférico

En este proceso, el decisor realiza reiteradamente, para cada criterio, una comparación subjetiva con el resto de criterios (dos criterios en cada comparación) asignado un valor de la escala numérica de Saaty según sus preferencias sobre los criterios que considera.

El resultado de esta comparación entre criterios es una matriz cuadrada, recíproca y positiva, denominada “matriz de comparaciones pareadas” (Tabla 4) en la que cada uno de sus componentes refleja la intensidad de preferencia de un criterio frente a otro. Por ejemplo, se ha establecido idéntica importancia (valor 1 en fila 1 columna 2) tras comparar los criterios “Transporte de materiales y combustibles (1)” y “Longitud del tendido eléctrico (2)”, pero se ha asignado

una importancia moderada (valor 3 en fila 1, columna 3) al comparar “Transporte de materiales y combustibles (1)” con “Propensión hídrica local (3)”.

Es importante considerar la relación entre el criterio y el objetivo para establecer la dirección de mejora de estos criterios. Así el objetivo para un criterio será de maximización cuando contribuya positivamente a la sostenibilidad y de minimización cuando su contribución sea negativa.

El cálculo de la media geométrica de los elementos de cada fila de la matriz de comparaciones pareadas permite obtener de forma sencilla el peso de cada criterio (W).

Asimismo la aplicación de los indicadores de evaluación territorial sobre distancia de aprovisionamiento, longitud

CRITERIOS	ALTERNATIVAS					
	El Vellón	Santos de la Humosa	Morata de Tajuña	Campo Real-Valdelecha	Belmonte de Tajo-Chinchón	
Transporte de materiales y combustibles (1)	19,305	13,775	10,983	11,741	10,123	
Longitud del tendido eléctrico (2)	15	2	0	12	15	
Propensión hídrica local (3)	-0,106	-0,791	-0,110	-0,161	-0,180	
Capacidad de acogida de emisiones atm.	NO ₂ (4)	0,51	0,24	0,40	0,43	0,55
	partículas (5)	0,47	0,35	0,37	0,39	0,35
	SO ₂ (6)	0,76	0,62	0,76	0,75	0,78
Distancia a zonas protegidas (7)	524	435	500	2.100	880	
Densidad de especies protegidas (8)	37	13	18	15	14	
Receptividad económica local (9)	3,35	0,33	17,48	7,50	0,43	
Sensibilidad local al empleo (10)	1,64	1,56	2,06	1,86	2,21	

Tabla 5: Matriz de preferencias para la elección de un emplazamiento para una cementera en la Comunidad de Madrid. Fuente: Elaboración propia

Orden	Alternativa	Φ	Φ^-	Φ^+
1	Belmonte de Tajo - Chinchón	0,3261	0,6449	0,3188
2	Campo Real - Valdilecha	0,2439	0,6219	0,3781
3	Morata de Tajuña	-0,0598	0,4665	0,5263
4	Santos de la Humosa	-0,1600	0,4140	0,5740
5	El Vellón	-0,3502	0,3091	0,6593

Tabla 6: Ordenación de alternativas y flujos de superación de acuerdo a la metodología PROMETHEE. Fuente: Datos obtenidos aplicando la herramienta Visual PROMETHEE

del tendido eléctrico, calidad del aire, y otros aspectos ecológicos, económicos y sociales, todos calculados mediante las ecuaciones (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7) y (8) para cada emplazamiento forma en conjunto la matriz de preferencias recogida en la Tabla 5.

Los valores de objetivos y pesos (Tabla 4) junto a los de la matriz de preferencia (Tabla 5) introducidos en la aplicación Visual PROMETHEE (Fig. 1) permiten obtener los flujos de preferencia (Φ). Los flujos de preferencia son positivos (Φ^+) o negativos (Φ^-), según se ha explicado en el apartado 2, y sobre ellos se establece la ordenación de opciones (Tabla 6).

Así bajo estos criterios y preferencias, las opciones de Belmonte de Tajo-Chinchón y Campo Real-Valdilecha son las más sostenibles y, por tanto, a considerar en estudios de mayor profundidad, mientras que las tres restantes con flujos de preferencia negativos serían las alternativas con menos posibilidades.

La metodología PROMETHEE es bastante robusta con respecto al valor umbral de la función de preferencia, pero en cambio, los resultados suelen tener una fuerte dependencia de los pesos asignados a los criterios, sobre todo cuando hay criterios muy contradictorios por lo que es necesario realizar un análisis de sensibilidad.

La aplicación Visual PROMETHEE dispone de varios instrumentos para este análisis de sensibilidad, siendo el más ilustrativo el que proporciona los intervalos de estabilidad que permiten establecer los valores entre los que puede variar un peso permaneciendo estables los demás de modo que, la ordenación final no varíe. Gráficamente resulta relevante comprobar el margen de variación del peso asignado a cada criterio para la que la ordenación permanece estable. El nivel de estabilidad representa el número de alternativas o emplazamientos que mantienen el orden. Cuanto mayores son los intervalos de estabilidad (WSI) más robusta será la ordenación frente a los pesos asignados a cada criterio (Fig. 6).

En el caso planteado se obtienen unos intervalos de estabilidad amplios en la mayoría de los criterios, incluso en el caso más restrictivo que exigiría el mantenimiento de la ordenación de las 5 alternativas de emplazamientos (Tabla 7).

4. CONCLUSIÓN

La introducción de indicadores de sostenibilidad en los modelos para la toma de decisiones multicriterio permite disponer de una importante herramienta de tanteo y valoración de alternativas en la elección de emplazamientos para el desarrollo de actividades industriales.

La aplicación de un modelo que clasifique, los indicadores según sean de comportamiento o relativos al territorio, tiene su utilidad ya que los indicadores de comportamientos van a ser de gran utilidad para la identificación de los indicadores territoriales más relevantes para la elección del emplazamiento.

Este procedimiento no se perfila como metodología alternativa a los Estudios de Impacto Ambiental que,

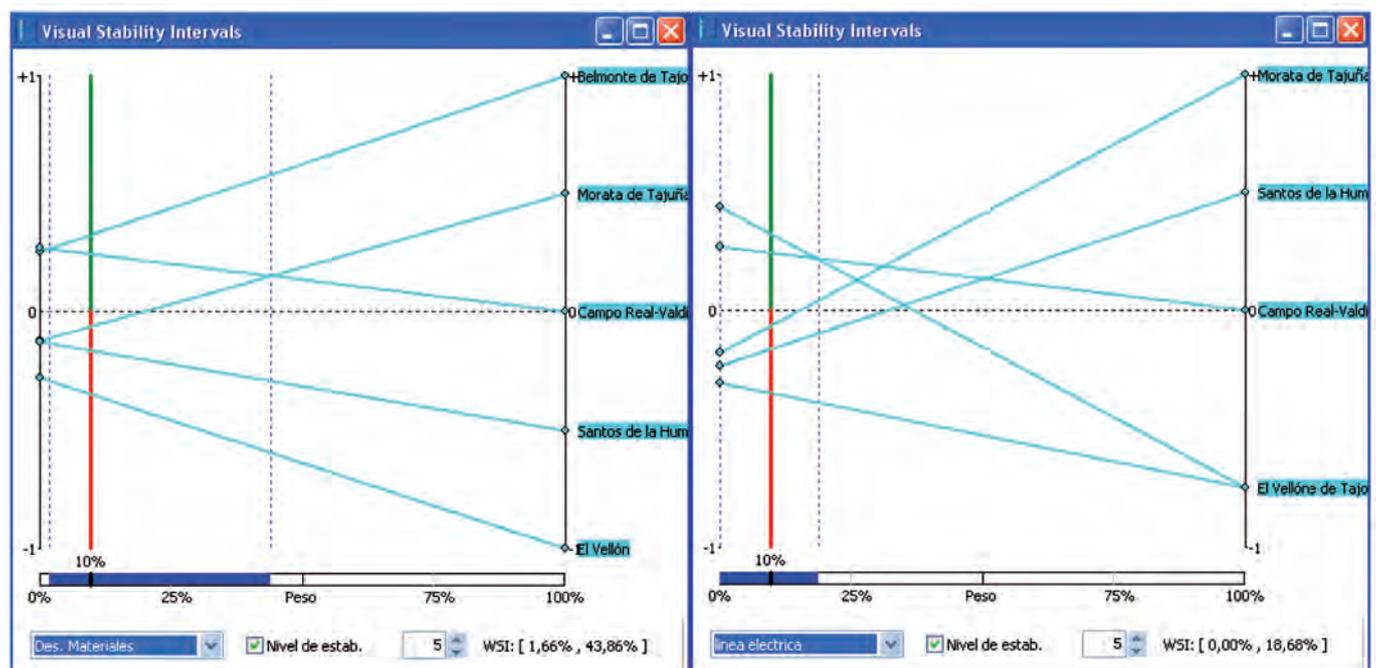


Figura 6: Intervalo de estabilidad para los criterios: Desplazamiento de materiales y combustibles (1). Longitud de tendido eléctrico (2). Fuente: Elaboración propia con Visual PROMETHEE

Criterio	Peso asignado (%)	Rango de estabilidad para el peso (%)		Amplitud
Transporte de materiales y combustibles (1)	10	1,66	43,86	42,2
Longitud del tendido eléctrico (2)	10	0	18,68	18,68
Propensión hídrica local (3)	8	1,27	15,86	14,59
Capacidad de acogida para NO ₂ (4)	5	0	15,49	15,49
Capacidad de acogida para partículas (5)	5	0	10,65	10,65
Capacidad de acogida para SO ₂ (6)	3	0	15,70	15,70
Distancia a zona protegida (7)	22	2,94	33,95	31,01
Densidad de especies (8)	32	24,47	35,33	10,86
Receptividad económica (9)	2	0	9,55	9,95
Sensibilidad al desempleo (10)	4	0	30,50	30,50

Tabla 7: Intervalos de estabilidad para los criterios manteniendo el orden de los 5 emplazamientos. Fuente: Datos obtenidos aplicando la herramienta Visual PROMETHEE

hoy por hoy, son la base para la obtención de permisos y autorizaciones, sino como una herramienta de tanteo, para valorar posibilidades de éxito de cada una de las alternativas previamente consideradas.

El empleo de metodologías para la toma de decisiones multicriterio proporciona un gran potencial de análisis, ya que además de obtener la ordenación cuantitativa de alternativas puede utilizarse para decidir sobre la mejor ubicación de una instalación, y puede llevar a cabo la simulación de diferentes resultados según varíen las preferencias o incluso los escenarios.

Al admitir multitud de criterios, resulta posible incorporar al modelo de sostenibilidad los criterios de coste y eficacia con lo que la empresa dispone de una valiosa valoración global. A su vez, la Administración puede disponer de un instrumento útil en el análisis de políticas de reequilibrio territorial.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sepúlveda S. Gestión del desarrollo sostenible en territorios rurales: Metodología para la planificación. San José: IICA, 2008 – 419 p. ISBN13: 978-92-9039-872-1.
- [2] Gaviria-Ríos MA. Apuntes de economía regional, Pereira, 2010. Edición electrónica gratuita. Texto completo en www.eumed.net/libros/2010f/873/
- [3] Segrelles-Serrano JA, Gómez-López JD, Palazón-Fernando S. Geografía Humana: Fundamentos, Métodos y Conceptos. Alicante: Editorial Club Universitario, 2002. 273p. ISBN: 84-8454-181-9.
- [4] Elguero-Merino JM. "Responsabilidad Social Corporativa". Dyna Ingeniería e Industria. Marzo, 2007. Vol. 82 p. 26-28
- [5] España. Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental. Boletín Oficial del Estado nº 296 de 11 de diciembre de 2013. p. 98151- 98227.
- [6] Conesa V. Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental, 4ª Edición. Madrid: Mundi-Prensa Libros, 2009. 864 pp. ISBN: 978-84-8476-384-0
- [7] Unión Europea. Directiva 96/61/CE, del Consejo, de 24 de septiembre, relativa a la prevención y al control integrado de la contaminación. Diario Oficial L 257 de 10 de octubre de 1996, p. 26.
- [8] España. Ley 16/2002, de 1 de julio, de Prevención y Control Integrados de la Contaminación. Boletín Oficial del Estado,

- núm. 157 de 2 de julio de 2002, p 23910- 23927
- [9] Romero C. Análisis de las decisiones multicriterio. 1º ed. Madrid: Isdefe, 1996.115p. ISBN:84-89338-14-0
- [10] Benayoun R, Roy b, Sussman B. Une Methode pour Guider le Choix en Presence des points de Vue Multiples. Note de Travail n° 49. Paris : Direction Scientifique de la SEMA (Metra International), juin 1966
- [11] Brans JP. «L'ingénierie de la décision; Elaboration d'instruments d'aide à la décision. La méthode PROMETHEE». En Nadeau R, Landry M editores, «L'aide à la décision: Nature, Instruments et Perspectives d'Avenir», Québec, 1982. 183-213 p. Presses de l'Université Laval
- [12] Saaty TL. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. San Francisco: McGraw Hill, 1980. ISBN: 0-07-054371-2. 287 p.
- [13] Barberis, G. M. F. LOS MÉTODOS PROMETHEE: Una Metodología de Ayuda a la Toma de Decisiones Multicriterio Discretas. 2002, Disponible en: http://www.uv.es/asepuma/recta/extraordinarios/Vol_01/01t.pdf [5/5/2013]
- [14] Luna-González JP, Rodríguez-Hurtado ME. "Ampliación de las posibilidades de uso de los indicadores de RSE". Dyna Ingeniería e Industria. Octubre, 2012. Vol. 87 p.558-565 DOI.: <http://dx.doi.org/10.6036/4586>
- [15] Grupo Cementos Portland Valderrivas. Declaración Medioambiental 2011 Fábrica El Alto. 72 pp. Disponible [2/05/2013] en: <http://www.valderrivas.es>
- [16] Grupo Cementos Portland Valderrivas. Memoria de Sostenibilidad 2011. 92 pp. Disponible [2/05/2013] en: <http://www.valderrivas.es>
- [17] Unión Europea. Reglamento (CE) No 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) no 761/2001 y las Decisiones 2001/681/CE y 2006/193/CE de la Comisión. *Diario Oficial* L 342 de 22.12.2009 p.1-45
- [18] GRI. *Guía para la elaboración de Memorias de Sostenibilidad*. Amsterdam: Global Reporting Initiative, 2006
- [19] España. Los transportes, las infraestructuras y los servicios postales. Informe Anual 2009. Madrid: Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento, 2010. NIPO: 161-10-129-1. 348p.
- [20] Comunidad de Madrid. Atlas del Medio Ambiente en la Comunidad de Madrid. Madrid: Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. 2007. 83p.

(Footnotes)

- 1 Valor Económico Generado
- 2 Valor Económico Distribuido

Sistema de indicadores de gestión ambiental en una escuela de ingeniería industrial



ENVIRONMENTAL MANAGEMENT INDICATORS IN AN INDUSTRIAL ENGINEERING SCHOOL

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5850> | Recibido: 22/05/2013 • Aceptado: 11/12/2013

Ramón Navarro-Antúnez, Carla Vintró-Sánchez,
Jordi Fortuny-Santos

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Manresa. Dpto. de Organización de Empresas. Avda. Bases de Manresa, 61-73 - 08242 Manresa. Tfno: +34 938 777281. navarro@epsem.upc.edu

ABSTRACT

• The purpose of this paper is to discuss the experience of a school of industrial engineering that adopted an environmental management system that includes performance indicators that encompass metrics of the environmental implications of the research and education that the school offers, and measures of how this education is assimilated by the students, and taken into account both in their present and future life.

The paper emphasizes that environmental management systems are often centered on the continual reduction of the negative effects on the environment that an organization may cause, but, although it is not usual (and hence this is the originality of this paper), organizations can also take account of their positive impacts. Universities might do so because they create and transmit knowledge and, moreover, they shape attitudes.

The relevance of the paper lies on the performance metrics. These findings are useful for implementing an environmental management system in any knowledge organization.

• **Keywords:** environmental management system, indicators, ISO 14001, knowledge organization, university.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es analizar la experiencia de una escuela de ingeniería industrial en el diseño de un cuadro de indicadores para un sistema de gestión medioambiental. Dicho cuadro incluye indicadores innovadores sobre las implicaciones ambientales de la investigación y de la educación que la escuela ofrece y medidas de cómo los alumnos asimilan esta educación y cómo ésta influye en su situación actual y en su futuro profesional a favor del medio ambiente.

El trabajo subraya que los sistemas de gestión medioambiental se suelen centrar en la reducción de impactos ambientales negativos, pero que en el caso de las organizaciones del conocimiento también se pueden considerar los impactos ambientales positivos, aspecto en el que se basa el contenido de este artículo.

El sistema de indicadores que se describe puede ser de utilidad en la implantación de un sistema de gestión medioambiental en otras organizaciones del conocimiento, más allá del ámbito estricto de la educación superior.

Palabras clave: sistema de gestión ambiental, indicadores, ISO 14001, organizaciones del conocimiento, universidad.

1. INTRODUCCIÓN

Desde la Revolución Industrial, y especialmente en la segunda mitad del S. XX, el impacto de la humanidad sobre la tierra ha aumentado drásticamente. El crecimiento de la población, la búsqueda de recursos naturales, la industrialización y la construcción de infraestructuras ha modificado y dañado el entorno. Los problemas ambientales son tan serios que han despertado nuestro interés por el medioambiente y nos han hecho tomar conciencia de temas como contaminación y reciclaje. Esta mayor conciencia ambiental afecta a la actividad de las empresas [1,2] y, a la vez, acarrea una legislación más exigente.

En el marco de la calidad total (TQM), las empresas tienen por meta satisfacer las expectativas de sus clientes [3,4] (suponiendo que la satisfacción del cliente conlleva mejores resultados para la empresa [5]) y actualmente, estas expectativas incluyen sin duda aspectos medioambientales, puesto que la sociedad actual cada vez es más consciente de problemas como la escasez de agua, el calentamiento global y el cambio climático.

Una evidencia de esta concienciación está en su presencia en los medios de comunicación y en las instituciones educativas, donde los temas medioambientales aparecen en los planes de estudios, desde la enseñanza primaria hasta la universidad.

En consecuencia, las presiones legales y sociales sobre las empresas son cada vez mayores, por lo que las empresas deben decidir hasta qué punto están comprometidas con el medioambiente, siendo la contribución mínima de la empresa a la sostenibilidad la gestión de su impacto medioambiental y el cumplimiento de la legislación vigente [6,7].

Muchas empresas encuentran que un sistema de gestión ambiental (de aquí en adelante SGA) ayuda en la consecución de estos objetivos, puesto que permite identificar y gestionar los aspectos medioambientales y fijarse objetivos ambientales.

Por definición, un sistema de gestión ambiental es [8] “la parte del sistema de gestión de la empresa que incluye una organización, actividades de planificación, responsabilidades, procedimientos, procesos y recursos para desarrollar, implementar, mantener y revisar la política medioambiental de la empresa”. Los SGA deben asegurar que la política medioambiental sea apropiada al tipo de empresa e incluya el compromiso con la mejora continua, la prevención de la polución y el cumplimiento de la ley. Además, un SGA permite que las empresas sean más eficientes puesto que les permite renovar sus procesos por otros de menores emisiones y reducir actividades que no aportan ningún valor como el manejo y el almacenaje de residuos [9]. Finalmente, disponer de un SGA mejora la imagen ante los grupos de interés [10] pues indica que la empresa hace esfuerzos para minimizar su impacto ambiental y atrae a clientes también comprometidos con la conservación del entorno [11]. Las organizaciones europeas pueden escoger entre dos vías para definir su sistema de gestión medioambiental, la norma ISO 14001 y el reglamento del Parlamento europeo *Eco-Management and Audit Scheme* (EMAS).

Si el párrafo anterior es válido para cualquier tipo de organización, lo es también para la universidad. Además, la universidad y otras organizaciones del conocimiento relacionadas con formación e investigación poseen la característica diferencial sobre otro tipo de entidades que su actividad puede tener impactos positivos sobre el medio ambiente, entendiendo por impactos positivos las consecuencias que la formación universitaria puede tener sobre el estado de sensibilización, mentalización y responsabilidad hacia el medioambiente de los futuros profesionales, así como la posible generación de conocimientos orientados a la disminución de los impactos ambientales actuales. Por dicho motivo, en este trabajo se presenta la experiencia de un centro universitario que lleva a desarrollar un sistema de indicadores de gestión ambiental cuya particularidad principal es la de incluir indicadores sobre aspectos positivos. La inclusión de dichos indicadores debe permitir seguir y potenciar las acciones que lleven a realzar dichos aspectos positivos.

2. UNIVERSIDADES Y ASPECTOS AMBIENTALES

“Aspectos ambientales” [12] son elementos de las actividades, productos o servicios de una organización que pueden interactuar con el medio ambiente, especialmente si tienen un impacto ambiental significativo (emisiones atmosféricas, reciclaje, uso y contaminación de la tierra, uso de recursos naturales y materias primas, efectos sobre la biodiversidad,

riesgo de accidentes medioambientales, etc.). Aunque el reglamento EMAS [13] define el impacto ambiental como cualquier cambio en el entorno, tanto adverso como benéfico, lo habitual es referirse a los aspectos negativos. Por este motivo, las empresas consideran sus impactos negativos y preparan sus programas para reducirlos, pero un SGA puede también considerar los aspectos positivos. Por ejemplo ISO 14031 [9] incluye guías para evaluar los impactos positivos.

Creighton [14] expone los efectos pedagógicos de la *ambientalización* (palabra habitualmente empleada en España como traducción del inglés “greening”) de un centro universitario en términos de reciclaje y de reducción del consumo de energía y residuos, porque las universidades enseñan y demuestran los métodos y consecuencias de la gestión ambiental a sus alumnos, a la vez que promueven la concienciación ambiental. La Cumbre Mundial de Desarrollo Sostenible celebrada en Johannesburgo en 2002 reconocía formalmente a la educación como un mecanismo clave para promover la protección y la conservación medioambiental y subrayaba que la educación debía ayudar a la sociedad a alcanzar mayores niveles de sostenibilidad [15].

En la literatura pueden encontrarse estudios de diferentes autores que han analizado el desarrollo sostenible de las universidades [16, 17,18]. Estos trabajos indican que las universidades tienen la obligación moral de trabajar en pro del desarrollo sostenible de las sociedades de modo que sean respetuosas con el entorno. Así es que, la universidad tiene un papel importante en el comportamiento ambiental de las empresas y de sus dirigentes [19,20], por lo que debe contribuir al aumento del compromiso de sus alumnos con el medioambiente y la sostenibilidad [21,22].

Universidades de todo el mundo han emprendido todo tipo de prácticas como reciclaje o ahorro de agua [23] e incluso la implantación de sistemas de gestión ambiental [24]. Por ejemplo, en España, la facultad de Farmacia de la Universidad de Granada fue el primer centro universitario que alcanzó la certificación ISO 14001 para todos sus procesos (otras universidades ya tenían certificaciones parciales). En enero de 2008, todas las dependencias y todas las actividades (docencia, investigación y servicios) de la Universidad de Granada quedaban completamente certificadas según ISO 14001:2004. Pero en todos los casos que se ha podido analizar, los SGA de las universidades se centran en la reducción de impactos negativos de sus operaciones, al igual que en las empresas, y no se ha podido encontrar ningún caso donde se cuantifiquen los impactos positivos, ya postulados por Keniry [25], lo cual es sorprendente pues los impactos positivos son tan importantes que no deben ser ignorados por el SGA, sino medidos y evaluados.

Ejemplos de impactos positivos en el caso de las Universidades de Ingeniería son: desarrollo de tecnologías limpias por medio de la investigación; sensibilización de los futuros titulados quienes trabajarán en áreas con fuerte problemática ambiental por lo que jugarán un papel importante en la reducción del impacto ambiental [26] que estará condicionado por su compromiso con el entorno y por la sensibilización medioambiental recibida en una etapa escolar.

Tal y como establece Van Berkel [27], los programas educativos deberían infundir conciencia medioambiental para

reconocer potenciales impactos negativos sobre el entorno y contribuir a su minimización y gestión. Por ejemplo, la Universidad Tecnológica de Delft ha introducido la sostenibilidad en los contenidos curriculares de los futuros ingenieros a través de diferentes acciones como una asignatura introductoria denominada ‘Tecnología en el desarrollo sostenible’, o una especialización en sostenibilidad [17]. Otro ejemplo es la Universidad Autónoma Metropolitana de Méjico, que ha estado trabajando en la implantación de un ‘Plan Ambiental Institucional’ [28].

3. APLICACIÓN DE UN SGA EN UNA ESCUELA DE INGENIERÍA

La Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) aprobó su primer plan de *ambientalización* en 1996. Entre otros, incluía la introducción de temas ambientales en todas las asignaturas y la promoción de la investigación en temas medioambientales [29]. En 2004, la Universidad analizó la conveniencia de implantar un SGA [30] y decidió que dos centros fuesen los primeros en implantar su propio SGA, según el reglamento EMAS, siendo uno de ellos la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Manresa (EPSEM), un centro con 85 años de antigüedad que ofrece hoy 8 títulos diferentes. Actualmente cuenta con más de 900 alumnos y alrededor de 100 profesores. La Escuela siempre ha mostrado gran interés por la temática

ambiental y, como muestra de ello, en 2002 estudió su huella ecológica como medida de su impacto ambiental [31].

La implantación del SGA empezó en 2007 cuando la Escuela definió su política ambiental. Se realizó una evaluación de la situación inicial, se identificaron los procesos, los aspectos ambientales y los impactos de cada proceso (Tabla 1) y se comprobó el cumplimiento de los aspectos legales.

El SGA se documentó en 2008 y en él se incluyeron 16 procedimientos. Para cada procedimiento se crearon distintas instrucciones, abarcando también temas de investigación y de docencia. A lo largo de 2008 se realizaron sesiones de formación y simulacros de emergencia. Se fijaron objetivos y un programa que muestra cómo alcanzar los objetivos. En 2009, se realizaron las correspondientes auditorías internas del sistema y las consiguientes acciones correctivas, quedando el sistema listo para su eventual certificación.

El propio sistema EMAS alienta a las organizaciones a utilizar indicadores de comportamiento medioambiental, con la finalidad de convertir los datos recogidos en información comprensible para su posterior análisis. Estos indicadores son indicadores de desempeño que permiten medir el desarrollo de los objetivos de un programa, proyecto o institución, mediante su comparación en el tiempo con los correspondientes referentes internos o externos (AECA, 1997). Por su parte, la norma UNE 66175:2003 (Sistemas de Gestión de Calidad. Guía para la implantación de sistemas de indicadores) define a los indicadores como “Datos o conjunto de datos que ayudan a medir

PROCESO	IMPACTOS NEGATIVOS	IMPACTOS POSITIVOS
Diseño y revisión de plan de estudios	-	Inclusión de temas ambientales
Innovación docente	-	Métodos para la concienciación ambiental
Promoción, matrícula y bienvenida al alumnado	Consumo de recursos	-
Docencia oficial	Transporte, consumo de recursos, residuos	Información y concienciación en temas ambientales
Evaluación de la calidad en la educación	-	Aumento del compromiso ambiental
Formación complementaria	Transporte, consumo de recursos, residuos	Aumento del compromiso ambiental
Formación en empresas	Transporte, consumo de recursos, residuos	Aumento del compromiso ambiental
Movilidad internacional	Transporte	Intercambio de experiencias
Evaluación del alumnado	-	Evaluación de la competencia en sostenibilidad
Investigación	Transporte, consumo de recursos, residuos	Conocimiento para un entorno mejor
Actividades externas	Transporte, consumo de recursos, residuos	-
Gestión de recursos	Consumo de recursos	-
Compras	Consumo de recursos	-
Mantenimiento de instalaciones	Transporte, consumo de recursos, residuos	-
Gestión de recursos humanos	Comportamientos agresivos hacia el medio ambiente	Comportamientos favorables hacia el medio ambiente
Planificación y control del SGA	-	Reducción de impactos negativos y aumento de los positivos.
Gestión de documentación e información	Consumo de recursos	-
Evaluación, análisis y mejora del SGA	-	Reducción de impactos negativos y aumento de los positivos.

Tabla 1: Identificación de impactos ambientales positivos y negativos de cada proceso

objetivamente la evolución de un proceso o de una actividad”. Según AECA (1997), estos indicadores deben ser lo suficientemente precisos y exhaustivos a fin de que permitan efectuar un seguimiento de los aspectos más importantes del programa, servicios u organización analizados.

De hecho, los indicadores de comportamiento medioambiental ayudan a las organizaciones a gestionar los efectos medioambientales derivados de sus actividades y a cumplir mejor los requisitos de notificación obligatoria según dispone la Directiva 96/61/CE relativa a la prevención y al control integrado de la contaminación. Diferentes publicaciones han analizado el uso de indicadores de comportamiento medioambiental, por ejemplo puede citarse el trabajo de *World Business Council for Sustainable Development* titulado “*Measuring eco-efficiency a guide to reporting company performance*” publicado en el año 2000, el trabajo de la *British Association of Certified and Chartered Accountants* titulado “*An introduction to environmental reporting*” publicado en 2001, o el trabajo de la *Association for Environmental Management in Banks, Saving Banks and Insurance Companies* titulado “*Time to act -Environmental Management in Financial Institutions -A survey of recent developments including principles and guidelines for in-house eco-balances of financial service providers*” publicado en 1997.

En la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Manresa se implantaron 13 indicadores de funcionamiento que pertenecen a tres categorías. Las categorías A y B son comunes a todos los SGA (aunque cada organización debe decidir qué medir y cómo medirlo), y la categoría C es propia de la Escuela.

Cada una de las categorías mencionadas responde a un objetivo concreto de mejora continua. Los indicadores de la categoría A tienen como objetivo la medición del progreso del estado de implantación y cumplimiento del SGA. Los de la categoría B, por su parte, pretenden el seguimiento de la evolución de los impactos ambientales tradicionales, que en este artículo se identifican como impactos negativos, como son los consumos de recursos, la generación de residuos, las emisiones, vertidos, etc. Por el contrario, los indicadores de la categoría C han de permitir el conocimiento de la evolución de los que aquí se denominan impactos positivos, o sea, el resultado de las actividades que una organización del conocimiento puede efectuar a favor del medio ambiente.

Mientras que existe una larga y conocida trayectoria de medición y uso para la mejora continua de los indicadores de las categorías A y B en todo tipo de organizaciones, no se conocen experiencias consolidadas para los objetivos de la categoría C. Por lo tanto, es en este campo específico donde se requiere una experimentación, que se describe en el presente artículo.

En el momento de la implantación del SGA en la EPSEM, se diseña un panel con los siguientes indicadores.

3.1. INDICADORES DEL COMPORTAMIENTO AMBIENTAL

Tres indicadores de comportamiento ambiental constituyen el grupo A.

A1: “Grado de extensión del sistema”. Mide en conjunto el grado de cumplimiento con los requisitos legales,

el porcentaje de objetivos cubierto, el porcentaje de personas implicadas en el sistema, el porcentaje de proveedores implicados, los resultados de las auditorías internas, la proporción de acciones correctivas que se han resuelto y la proporción de proveedores que han implantado un SGA.

A2: “Eficacia del sistema”. Mide la cantidad de actividades preventivas que se adoptan, el número de instrucciones que son operativas, el número de horas de formación ambiental del personal, el número de sugerencias que se reciben y el número de actividades o proyectos que se generan. Mide si los objetivos del SGA se alcanzan de modo eficiente a lo largo del año.

A3: “Grado de aplicación del sistema”. Mide el resultado de la auditoría interna anual, aplicando la metodología descrita en el correspondiente procedimiento, y se expresa por medio del número de No Conformidades detectadas.

3.2. INDICADORES DE LA SITUACIÓN AMBIENTAL DE LA ESCUELA

El segundo grupo (B) está formado por cinco indicadores de la situación ambiental de la escuela.

B1: “Consumo de recursos”. Expresa el consumo medio por persona de cada uno de los recursos implicados en los procesos de funcionamiento del centro universitario. Para ello hay que relacionar los consumos totales de cada uno los recursos con el número de personas equivalentes a una jornada a tiempo completo de ocho horas de presencia y cinco días por semana en el centro (profesores, estudiantes o personal administrativo). Por ejemplo, un profesor a tiempo parcial que permanece cuatro horas en el centro universitario cada día, se contabiliza como 0,5 personas equivalentes.

Aunque es necesario medir el consumo por persona equivalente de cada tipo de recurso (papel, recambios de impresora, agua, electricidad, gas, etc.) es aún más útil considerar como este consumo va evolucionando a lo largo del tiempo, para verificar los resultados de las medidas de contención adoptadas. El programa anual de gestión ambiental establece una tasa esperada de mejora (p) que el sistema debería proporcionar.

Para facilitar su visualización a todas las personas de la organización, este indicador se presenta en forma de señal visual, como un semáforo (Figura 1). Dado que el consumo de cada uno de los recursos se mide en distintas unidades (kilogramos por persona, kilovatios-hora por persona, etc.), el indicador de síntesis se calcula a partir del valor que le corresponde según el color del indicador visual.

Color	Valor	Significado
● Rojo	0	El consumo se ha incrementado más del p %
● Ambar	1	El consumo se ha incrementado entre 1% y p %
● Amarillo	2	El consumo es constante (menos de un 1 % de variación)
● Verde claro	3	El consumo se reduce entre 1 % y p %
● Verde	4	El consumo se reduce más del p %

Fig. 1: Indicador visual sobre el consumo de recursos

B2: “Medio de transporte de las personas para desplazarse hasta el centro universitario”. Tiene en consideración el número de días por semana (desde 0 hasta 5) en que cada persona se dirige al campus conduciendo un vehículo particular motorizado. En este caso cada individuo se contabiliza como una persona, independientemente de las horas que permanece en el centro. La ecuación 1 muestra cómo se calcula el indicador, siendo n el número de cuestionarios válidos obtenidos.

$$B_2 = 5 - \frac{\sum_{i=1}^n \text{días}_i}{n} \quad (1)$$

Adicionalmente, cada año se realiza una encuesta más detallada en la que se determinan los porcentajes de los distintos medios de transportes utilizados por profesores, estudiantes y personal administrativo para desplazarse hasta el campus (automóvil particular, motocicleta, transporte público, bicicleta o a pie).

B3: “Generación de residuos”. Mide la cantidad de residuos (papel, plásticos, vidrio, materias orgánicas, latas, material electrónico, baterías, residuos de laboratorio, desperdicios) que una persona equivalente genera en un año. Como en el indicador B1, se utiliza un indicador visual tipo semáforo. El valor del indicador de síntesis se calcula a partir de los valores del indicador visual de cada tipo de residuo (Figura 2).

Color	Valor	Significado
● Rojo	0	El residuo se ha incrementado más del p %
● Ambar	1	El residuo se ha incrementado entre 1% y p %
● Amarillo	2	El residuo es constante (menos de un 1% de variación)
● Verde claro	3	El residuo se reduce entre 1% y p %
● Verde	4	El residuo se reduce más del p %

Fig. 2: Indicador visual de generación de residuos

B4: “Emisiones”. Mide la cantidad de productos contaminantes del aire que se emiten al año a la atmósfera. En el centro universitario estudiado, la única fuente de emisión considerada significativa es el sistema de calefacción que utiliza calderas de gas, cuya combustión puede generar productos contaminantes en función de si su funcionamiento es regular o incorrecto. Los valores de contaminantes como el monóxido o dióxido de carbono (CO_x), los óxidos de azufre (SO_x) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) se miden mensualmente, como parte de la gestión normal del mantenimiento de las calderas. El valor del indicador es el resultado de la propia medición.

B5: “Nivel de ruido generado por los talleres y laboratorios de la universidad”. Por medio de lecturas periódicas con sonómetro en los puntos predeterminados como más críticos en este sentido.

Puesto que los indicadores del grupo B se basan en datos

técnicos, relativamente simples de medir, no resulta particularmente complejo el organizar la obtención y cálculos de los mismos y, conceptualmente, no resultan muy diferentes de los que se podrían encontrar en un sistema de gestión ambiental de cualquier otra organización.

3.3. INDICADORES SOBRE DOCENCIA E INVESTIGACIÓN

El tercer grupo de indicadores es el relacionado con la educación y la investigación, actividades propias de una universidad, que denominamos grupo C [32]. Está formado por cuatro indicadores junto con sus correspondientes subindicadores.

C1: “Indicador de formación reglada”. Se refiere a los contenidos de la formación impartida que se orientan a la sensibilización y responsabilidad de los estudiantes. Está constituido por tres subindicadores:

- C1.1: “Implicación de los créditos impartidos en la sostenibilidad”. Expresa el porcentaje de las asignaturas impartidas en la universidad en cuya guía docente consta específicamente que la asignatura contribuye a desarrollar la competencia genérica “Sostenibilidad y Compromiso Social”.
- C1.2: “Implicación del profesorado en la incorporación de la sostenibilidad en la docencia”. Se construye a partir de una encuesta anual entre el profesorado sobre el grado en que los conceptos de sostenibilidad están presentes en su actividad docente. La encuesta consta de ocho preguntas con respuestas cerradas. Se puntúa cada pregunta hasta un total máximo de 100 puntos por encuesta.
- C1.3: “Implicación del profesorado en la sostenibilidad”. Se mide como el porcentaje de participación del profesorado en la encuesta correspondiente al indicador C12.

C2: “Interiorización de la sostenibilidad por parte de los estudiantes”. Una cosa es el esfuerzo de transmisión de conceptos sobre sostenibilidad hacia el estudiantado por parte de los profesores, y otra muy distinta es el nivel en que esta formación ha sido interiorizada por los estudiantes al acabar sus estudios. Este indicador pretende medir este resultado. Consiste en pedir a los estudiantes recién incorporados a la universidad que dibujen un mapa conceptual [33] sobre el “Ingeniero Industrial”. Un indicador visual tipo semáforo (C2 inicial) (Figura 3) mide la importancia que palabras como “sostenibilidad” o “medio ambiente” muestran en el mapa conceptual. El valor del indicador es el promedio de los diferentes mapas elaborados por los estudiantes. Del mismo modo, cuando los estudiantes realizan su trabajo o proyecto de final de carrera, se les pide que dibujen nuevamente el mapa conceptual sobre el “Ingeniero Industrial”, obteniéndose de esta forma el indicador (C2 final) (Figura 3). Se propone usar este instrumento para medir las diferencias entre el ingreso y el egreso de los estudiantes a través de la diferencia entre C2 final y C2 inicial (Ecuación 2). Esta técnica ha sido usada, en ámbitos diferentes, por otras universidades [34].

$$C2 = C2 \text{ final} - C2 \text{ inicial} \quad (2)$$

Color	Valor	Significado
●	0	No aparecen palabras como "sostenibilidad", "desarrollo sostenible" o "medio ambiente"
●	1	Aparece alguna palabra como "sostenibilidad", "desarrollo sostenible" o "medio ambiente"
● ● ●	2, 3 o 4	Además de la palabra "sostenibilidad" otras palabras como "medio ambiente", "económico", "social" o "humano" están presentes

Fig. 3: Indicador visual de la importancia de la sostenibilidad en los mapas conceptuales

C3: "Actividad profesional de los estudiantes, después de su paso por la universidad". Cuando los graduados vuelven a la universidad a recoger su título oficial se les pide que describan la relación entre su actividad profesional y el medio ambiente, y su nivel de implicación personal en la preservación del mismo, por medio de un modelo de múltiples respuestas. Cada una de las posibles respuestas tiene una puntuación (Figura 4). El valor del indicador es el promedio de las puntuaciones de las respuestas obtenidas cada año.

<input type="checkbox"/> Mi actividad profesional no tiene ninguna relación con el medioambiente <i>1 punto</i>	<input type="checkbox"/> Mi actividad profesional tiene poca relación con el medioambiente <i>2 puntos</i>	<input type="checkbox"/> Mi actividad profesional tiene relación con el medioambiente pero mis decisiones no tienen impacto ambiental <i>3 puntos</i>
<input type="checkbox"/> En mi actividad profesional tengo libertad para tomar decisiones que afectan o pueden afectar al medioambiente <i>5 puntos</i>	<input type="checkbox"/> Mis decisiones profesionales tienen en consideración prioritaria la protección y mejora del medioambiente <i>7 puntos</i>	
<input type="checkbox"/> La empresa donde trabajo apoya y comparte mi interés en la protección y mejora del medioambiente <i>9 puntos</i>	<input type="checkbox"/> La misión de la empresa donde trabajo es la protección y mejora del medioambiente <i>10 puntos</i>	

Fig. 4: Modelo de encuesta sobre la relación entre actividad profesional y medio ambiente

C4: "Actividad de investigación que se realiza en la universidad, que está relacionada con la sostenibilidad o el medioambiente". Se mide a través de dos subindicadores:

- C4.1: "Publicaciones y ponencias de profesores del centro universitario". Se obtiene a partir de la memoria anual de investigación del centro, contabilizando los artículos y ponencias en cuyo título están contenidas determinadas palabras clave, como por ejemplo sostenibilidad, compromiso social, medio ambiente, desarrollo sostenible, impacto ambiental, etc.
- C4.2: "Proyectos de Tesis doctorales". El valor del indicador es el promedio de todos los proyectos presentados en el año que tratan temas medioambientales y se expresa también en forma de indicador visual, tipo semáforo. Cada uno puntúa según el criterio de la Figura 5.

Color	Puntos	Significado
● Rojo	0	Los contenidos pueden ir contra la sostenibilidad
● Ambar	1	Contenidos no relacionados con la sostenibilidad
● Amarillo	2	Baja relación con sostenibilidad (mejora de técnicas existentes)
● Verde claro	3	Alta relación (nuevas técnicas que mejoran las existentes)
● Verde	4	Muy alta relación (eliminación de impactos ambientales)

Fig. 5: Indicador visual de sostenibilidad en la investigación

Estos indicadores de desempeño están diseñados para conseguir los objetivos establecidos por la política medioambiental de la Escuela y forman parte de la definición de los procesos internos de la misma. Esta correlación se describe en las Tablas 2 y 3:

Indicadores C1, C2, C3:				
Objetivos a largo plazo: Los futuros profesionales de la industria son sensibles a temas ambientales y disponen de conocimientos para aplicar criterios ambientales en su actividad profesional.				
Objetivos a corto plazo: Al obtener la titulación, los estudiantes han interiorizado los conocimientos necesarios para asumir su futura responsabilidad ambiental.				
Indicador	Medio	Proceso	Entradas	Salidas
C1	Contenido ambiental de las asignaturas	Diseño, revisión y validación del plan de estudios	Necesidades sociales, propuestas de asociaciones profesionales y política ambiental de la Escuela	Programa docente del plan de estudios
C2	Actividades desarrolladas durante el proceso formativo	Docencia reglada	Programa docente, matriculación de estudiantes y profesorado	Evaluación y acreditación de los estudiantes
C3	Experiencia profesional de los titulados	Proceso externo a la Escuela	Contratación de estudiantes titulados	Impacto ambiental de la actividad profesional

Tabla 2: Indicadores relativos a la docencia

Indicador C4:				
Objetivos a largo plazo: Generar y difundir nuevos conocimientos relacionados con la sostenibilidad y la mejora medioambiental. Objetivos a corto plazo: Publicar artículos y desarrollar Tesis Doctorales relativos a la investigación efectuada en la Escuela sobre aspectos industriales que impactan sobre el medioambiente.				
Indicador	Medio	Proceso	Entradas	Salidas
C41	Publicaciones científicas y ponencias en conferencias y congresos nacionales e internacionales	Investigación	Necesidades sociales y política ambiental de la Escuela	Publicaciones, ponencias, pósters
C42	Tesis Doctorales desarrolladas dentro de programas de doctorado desarrollados en la Escuela	Investigación	Necesidades sociales y política ambiental de la Escuela	Tesis Doctorales

Tabla 3: Indicadores relativos a la investigación

4. RESULTADOS DE LA EXPERIENCIA

Como cabe suponer, la aplicación de los indicadores de las categorías A y B no ha presentado particulares problemas, a parte de la implantación de una serie de registros para poder disponer sistemáticamente de la información necesaria. Los indicadores de la categoría A se miden una vez al año, coincidiendo con la auditoría interna y la reunión de revisión del sistema por la Dirección, mientras que los indicadores de la categoría B se miden mensualmente (Indicadores B1, B3 y B4) o anualmente (Indicadores B2 y B5) según su naturaleza. A consecuencia de las acciones de mejora introducidas, algunos de los indicadores mencionados presentan mejoras significativas, como por ejemplo el consumo de papel y tóner de impresoras, que ha disminuido un 15% en el primer año de gestión del SGA, o el consumo de electricidad, que ha disminuido un 12% en el mismo periodo, mientras que otros no manifiestan prácticamente ninguna mejora, como por ejemplo el consumo de gas natural, que, en el mismo periodo, ha aumentado un 6%. Sin embargo, en todo caso el panel de indicadores ha cumplido sus objetivos y el camino de la mejora continua está implantado y consolidado.

Por el contrario, la obtención de los datos para los indicadores de la categoría C ha presentado una serie de dificultades, en algunos casos insalvables, que han obligado a un replanteamiento global de la categoría, que se resume en la tabla siguiente.

5. CONCLUSIONES

La presión legal y social sobre los impactos ambientales de las actividades industriales está incrementándose en los últimos años a consecuencia de la mayor sensibilización de la sociedad hacia la preservación del medio ambiente y la sostenibilidad del desarrollo económico. Las empresas pueden adoptar Sistemas de Gestión Ambiental para asegurar y demostrar su concienciación hacia el medio ambiente. Existen numerosas ventajas relacionadas con la implantación de un

SGA, como son la reducción de residuos, la mayor eficiencia en el consumo de recursos, el evitar sanciones legales por incumplimientos de las leyes y reglamentos ambientales vigentes o, incluso, un incremento de las ventas por la mejor imagen que la marca presenta ante su entorno social.

Sin embargo, el éxito de las iniciativas ambientales reside, básicamente, en las decisiones y los comportamientos de las personas (directivos, técnicos y empleados). Para desarrollar y hacer operativo un SGA, todas estas personas deben ser conscientes de su responsabilidad ambiental, y, en gran medida, esta concienciación hacia la preservación del medio ambiente depende de la educación recibida por cada una de ellas. Por lo tanto parece razonable el utilizar el potencial formativo de la educación superior para desarrollar la sensibilidad hacia el medio ambiente en los estudiantes, futuros profesionales del mañana.

En el mundo son varias las instituciones de educación superior que ya han implementado un Sistema de Gestión Ambiental tradicional (ISO 14001, EMAS, etc.), pero no es suficiente. Las Universidades deben promover la responsabilidad individual de sus estudiantes en la sostenibilidad del futuro desarrollo económico e impulsar el desarrollo y difusión de las tecnologías y técnicas no contaminantes, generando un impacto positivo hacia el medio ambiente.

Estos efectos positivos requieren ir más allá del alcance habitual de un SGA. No se trata únicamente de reducir o eliminar completamente la contaminación generada por la actividad educativa, sino de investigar y desarrollar métodos más limpios y sostenibles y, sobre todo, transmitirlos a las personas que, cuando serán graduados, podrán desarrollar actitudes y decisiones positivas hacia la sostenibilidad y el medio ambiente.

Esta es también la responsabilidad de las organizaciones del conocimiento. Por ello, cuando la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Manresa decide implantar un SGA, no busca solo una actividad poco impactante contra el medio ambiente, sino establecer un sistema orientado a desarrollar la responsabilidad individual de profesores y estudiantes a favor del medio ambiente.

Indicador	Comentario	Replanteamiento
C11	Resulta fácil de obtener. Básicamente se trata de determinar el % de las asignaturas impartidas, que, en su guía docente hacen referencia específica a la Competencia Genérica "SOSTENIBILIDAD Y COMPROMISO SOCIAL". En el curso 2011/2012, sobre un total de 168 asignaturas impartidas, solo 18 de ellas indican en su guía docente que la asignatura contribuye a esta Competencia Genérica. Ello representa un 10,71%	Como indicador no requiere ningún replanteamiento. El valor resultado obtenido en el curso 2011/12, obliga a efectuar una revisión de los contenidos de las asignaturas impartidas, ya que, desde el punto de vista del SGA, un 10,71% se considera bajo.
C12	En el curso 2011/12 se han obtenido 37 respuestas a la encuesta distribuida, que representa un 22% sobre el total de asignaturas impartidas. Para cada asignatura se determina el valor de puntuación de la encuesta (sobre un máximo de 100) y se efectúa el promedio de las asignaturas evaluadas. El resultado ha sido de 48,82.	Como indicador no requiere ningún replanteamiento. Los resultados del curso 2011/12 indican, sin embargo, que es necesario efectuar una campaña entre el profesorado para aumentar la participación, que se considera insuficiente.
C13	Ver comentarios del indicador C12	
C2	Este indicador ha presentado varias dificultades. Por una parte, para que el resultado sea representativo, los valores obtenidos al inicio y al final deben corresponder a los mismos sujetos. Por lo tanto, hasta junio 2013, en que finalizaran sus estudios la primera promoción de estudiantes de grado, no se podrá obtener el primer valor. Por otra parte, el desconocimiento por parte de los estudiantes sobre la herramienta del Mapa Conceptual al inicio de sus estudios hace que los mapas obtenidos en su ingreso a la Universidad resulten poco significativos.	Se replantea la conveniencia de comparar los resultados de los Mapas Conceptuales de un mismo curso, aunque sean de estudiantes distintos, para disponer de datos tempestivos. En realidad lo que se propone es medir la sensibilidad del colectivo y no a nivel individual. Por otra parte, se plantea la necesidad de efectuar a los estudiantes iniciales una presentación sobre que son y cómo se realizan los Mapas Conceptuales antes de efectuar el mapa inicial.
C3	No hay datos disponibles, ya que la primera promoción de estudiantes graduados no acabará sus estudios hasta finales del curso 2012/13.	Como indicador no requiere ningún replanteamiento.
C41	Identificadas 47 publicaciones en el año 2011 con contenidos medioambientales, de las que son autores profesores de la Escuela.	Como indicador no requiere ningún replanteamiento.
C42	Curso 2009/10: 3 tesis doctorales relacionadas con la preservación del medio ambiente. Curso 2010/11: 2 tesis doctorales relacionadas con la preservación del medio ambiente. Curso 2011/12: 0 tesis doctorales relacionadas con la preservación del medio ambiente.	Resulta muy subjetiva la evaluación de los contenidos de las tesis doctorales de la forma que describe el semáforo mencionado en el apartado 3.3 para este indicador. Por lo tanto se propone substituir el criterio descrito por otro criterio idéntico al que se utiliza para el indicador C41. Por otra parte, el número de tesis doctorales leídas en un año resulta demasiado bajo para que las tendencias detectadas en el indicador sean representativas. Por lo tanto, se propone contabilizar los tres últimos años en vez de solo el último.

Tabla 4: Resultados de la experiencia

Dado que sin parámetros que permitan medir el progreso, los planes de mejora son inefectivos, la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Manresa ha desarrollado un panel de indicadores para su SGA. Algunos de ellos monitorizan los aspectos de comportamiento y situación ambientales que son habituales en todo sistema de gestión ambiental para medir los impactos negativos de la organización, pero se incluyen otros indicadores específicos para expresar el progreso de los impactos positivos expuestos, que, al resultar absolutamente innovadores, han supuesto notables dificultades en su diseño e implantación y, en algunos casos, han requerido reorientaciones considerables, pero que, al final, presentan una perspectiva optimista para su utilización para el seguimiento de los múltiples aspectos de la mejora continua a favor de la preservación del medio ambiente.

El sistema de gestión ambiental de la Escuela Politécnica

Superior de Ingeniería de Manresa se inició en 2007, se documentó en 2008 y superó su primera auditoría interna en 2009. En aquel momento, la UPC podría haber tenido los primeros centros docentes universitarios con una certificación EMAS en España. Sin embargo, tras estallar la crisis económica y financiera en 2008, y la correspondiente posterior reducción de los recursos disponibles en la universidad pública de nuestro país, la certificación aún no ha tenido lugar (ni como EMAS ni como ISO 14001) puesto que la certificación y su mantenimiento posterior resultan muy costosos, y en el momento actual las prioridades económicas están centradas en otros aspectos. El sistema está vigente, aunque acusa la falta de estímulo que da la certificación exterior, y tan pronto como las circunstancias económicas del país lo permitan, la certificación estará al alcance de la mano.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Angell LC, Klassen RD. "Integrating environmental issues into the mainstream: an agenda for research in operations management", *International Journal of Operations & Production Management*. 1999. Vol. 11-3, P. 63-76.
- [2] Corbett CJ, Keindorfer P. "Environmental management and operations management: introduction to part 1 (manufacturing and eco-logistics)", *Production and Operations Management*. Summer 2001. Vol. 10-2, P. 107-111. (doi <http://dx.doi.org/0.1111/j.1937-5956.2001.tb00072.x>).
- [3] Kano N, Seraku N, Takahashi F, Tsuji S. "Attractive quality and must-be quality", *The Journal of the Japanese Society for Quality Control*. April 1984. Vol. 14-2, P. 147-156.
- [4] Forza C, Filippini R. "TQM impact on quality conformance and customer satisfaction: a causal model", *International Journal of Production Economics*. June 1998. Vol. 55-1, P. 1-20. (doi [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273\(98\)00007-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00007-3)).
- [5] Hallowell R. "The relationships of customer satisfaction, customer loyalty, and profitability: an empirical study", *International Journal of service industry management*. 1996. Vol. 7-4, P. 27-42. (doi <http://dx.doi.org/10.1108/09564239610129931>).
- [6] Shrivastava P. "The role of corporations in achieving ecological sustainability", *Academy of management review*. October 1995. Vol. 20-4, P. 936-960.
- [7] Sarkis J. "Manufacturing's Role in Corporate Environmental Sustainability: Concerns for the New Millennium", *International Journal of Operations and Production Management*. January 2001. Vol. 21-5/6, P.666-686.
- [8] ISO. ISO 14031:1999 Environmental Management. Environmental performance evaluation. Guidelines, ISO Central Secretariat, Geneva (Switzerland), 1999.
- [9] Porter M, Van der Linde C. "Towards a New Conception of the Environment – Competitiveness Relationship", *Journal of Economic Perspectives*. 1995. Vol. 9-4, P. 97-118.
- [10] Morrow D, Rondinelli D. "Adopting corporate environmental management systems: motivations and results of ISO 14001 and EMAS certification", *European management journal*. April 2002. Vol. 20-2, P. 159-171. (doi [http://dx.doi.org/10.1016/S0263-2373\(02\)00026-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0263-2373(02)00026-9)).
- [11] Poksinska B, Dalgaard JJ, Eklund JAE. "Implementing ISO 14000 in Sweden: motives, benefits and comparisons with ISO 9000", *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2003. Vol. 20-5, P. 585-606. (doi <http://dx.doi.org/10.1108/02656710310476543>).
- [12] Europe. "Regulation (EC) No 761/2001 of the European parliament and of the Council of 19 March 2001 allowing voluntary participation by organizations in a Community eco-management and audit scheme (EMAS)", *Official Journal of the European Communities*. 2001. No. 114-24-4-2001, P. 1-29.
- [13] EMAS-UK. *EMAS – Why you should register* [en línea]. [UK]: 2008 [ref. de 12 de Marzo de 2008]. Disponible en Web: <<http://www.emas.org.uk/>>.
- [14] Creighton SH. *Greening the Ivory Tower: Improving the Environmental Track Record of Universities, Colleges and Other Institutions*. MIT Press, Cambridge, 1999. ISBN 978-0262531511.
- [15] UNESCO. *Policy Dialogue 1: ESD and Development Policy: Education and the Search for a Sustainable Future*. UNESCO, Paris.
- [16] Lozano R. "Incorporation and institutionalization of SD into universities: breaking through barriers to change", *Journal of Cleaner Production*. 2006. Vol. 14-9/11, P. 787-796. (doi <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.12.010>).
- [17] Kamp L. "Engineering education in sustainable development at Delft University of Technology", *Journal of Cleaner Production*. 2006. Vol. 14-9/11, P. 928-931. (doi <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.11.036>).
- [18] Cortés AC, Segalas J, Cebrian G, Junyent M, Tilló T, Marquilles P, Montserrat M. "Sustainability Competences in Catalan University Degrees", In: *Proceedings of the 6th Conference on Environmental Management for Sustainable Universities (EMSU)*. (Delft, The Netherlands 2010).
- [19] Dahle M, Neumayer E. "Overcoming barriers to campus greening. A survey among higher educational institutions in London, UK", *International Journal of Sustainability in Higher Education*. 2001. Vol. 2-2, P. 139-160. (doi <http://dx.doi.org/10.1108/14676370110388363>).
- [20] Uhl C, Anderson A. "Green destiny: universities leading the way to a sustainable future", *Bioscience*. 2001. Vol. 51-1, P. 36-42. (doi [http://dx.doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0036:GDU LTW\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0036:GDU LTW]2.0.CO;2)).
- [21] Leal W, MacDermot F, Padgam J. *Implementing Sustainable Development at University Level: A Manual of Good Practice*. Bradford, England: European Research and Training Center on Environmental Education, 1996. ISBN 1-85143-149-7.
- [22] Wright TSA. "Definitions and frameworks for environmental sustainability in higher education", *International Journal of Sustainability in higher education*. 2002. Vol. 3-3, P. 203-220. (doi <http://dx.doi.org/10.1108/14676370210434679>).
- [23] Fisher RM. "Applying ISO 14001 as a business tool for campus sustainability: A case study from New Zealand", *International Journal of Sustainability in Higher Education*. 2003. Vol. 4-2, P. 138-150. (doi <http://dx.doi.org/10.1108/14676370310467159>).
- [24] Herremans I, Allwright DE. "Environmental management systems in North American Universities. What drives good performance?", *International Journal of Sustainability in Higher Education*. August 2000. Vol. 1-2, P. 168-181. (doi <http://dx.doi.org/10.1108/1467630010371902>).
- [25] Keniry J. "Ecodemia Campus environmental Stewardship at the turn of the 21st century", *National Wildlife Federation*, Washinton. 1995.
- [26] Abdul-Wahab SA. "The need for inclusion of environmental education in undergraduate engineering curricula", *International Journal of Sustainability in Higher Education*. 2003. Vol. 4-2, P.126-137. (doi <http://dx.doi.org/10.1108/14676370310467140>).
- [27] Van Berkel R. "Integrating the environmental and sustainable development agendas into minerals education", *Journal of Cleaner Production*. October 2000. Vol. 8-5, P. 413-423. (doi [http://dx.doi.org/10.1016/S0959-6526\(00\)00045-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0959-6526(00)00045-7)).
- [28] Juárez-Nájera M, Dieleman H, Turpin-Marion S. "Sustainability in Mexican Higher Education: towards a new academic and professional culture", *Journal of Cleaner Production*. 2006. Vol. 14-9/11, P. 1028-1038. (doi <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.11.049>).
- [29] Ferrer-Balas D. "Global environmental planning at the Technical University of Catalonia", *International Journal of Sustainability in Higher Education*. 2004. Vol. 5-1, P.48-62. (doi <http://dx.doi.org/10.1108/14676370410512580>).
- [30] Baldasano JM, Gassó S, Arévalo G. *Propuesta para la implantación de un Sistema de Gestión Medioambiental en la Universidad Politécnica de Cataluña*. Informe final. Universitat Politècnica de Catalunya, 2004.
- [31] Busquets P, Jorge J. *La petjada ecològica de l'EUPM*. Escola Politècnica de Manresa, 2002.
- [32] Aguado-Chao JC, Busquets-Rubio P, Cortés Cardona AC, Fortuny-Santos J, González-Sisó MR, Navarro-Antúnez R, Verdú-González AMC. "Environmental Management System Performance Indicators for a Knowledge Organization. Experiences at the Technical University of Catalonia (UPC)", In: *Proceedings of the 3rd World Conference on Production and Operations*. Japanese Operations Management and Strategy Association. Chapter 10 Environmental and Sustainable Management (Tokio 2008), P. 1760-1773.
- [33] Ausubel DP, Novak JD, Hanesian H. *Educational psychology: a cognitive view*. New York: Holt McDougal, 1978. ISBN 978-0030899515.
- [34] Bousquet WS. "An application of Ausubel's Learning Theory to Environmental Education: A study of concept mapping in College Natural Resources Management Course", Ph Thesis, Ohio State Univ., Columbus. Coll. of Education, 1982.

Arquitectura de control electrónico en cuadros de maniobra de máquinas de control numérico para corte por plasma y oxigás



ELECTRONIC CONTROL ARCHITECTURE IN CABINETS FOR PLASMA AND OXIFUEL CNC CUTTING MACHINES

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5840> | Recibido: 10/03/2013 • Aceptado: 28/05/2013



José Ignacio Suárez-Marcelo, Alfonso Marcos-Hernández, Miguel Ángel Jaramillo-Morán, Abel Perriñez-Torvisco, Enrique Martínez de Salazar-Martínez

UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA. Escuela de Ingenierías Industriales. Dpto. de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática. Avda. de Elvas, s/n - 06006 Badajoz. Tfno: +34 924 289600. jmarcelo@unex.es

ABSTRACT

• Nowadays cutting machines usually used in industry are controlled by a Computer Numeric Control (CNC) system working with a lot of signals which communicates with sensors and actuators in the machine through a control cabinet. In many cases this unit is designed by the cutting machine manufacturer (who is usually different from that of the CNC) and, as he is not a specialist in electronic design, the control cabinet is electrically implemented with the logic functions carried out in a discrete way by means of relays. This solution generates a hard wiring work when mounting onto the machine and makes it very difficult to repair when a failure is detected.

This work presents a new electronic control system which replaces the old electrical one, with all its relays, usually used in this sort of machines. This new system has been tested in a plasma and oxifuel cutting machine. It has provided a noticeable reduction in the machine wiring and a simplification of the control cabinet design. These facts mean that the machine is now easier to assembly with an important reduction in purchasing and maintenance costs.

• **Keywords:** plasma and oxifuel cutting machine, CNC, control electronics, wiring reduction, control cabinets.

RESUMEN

Normalmente, las máquinas de corte implantadas en la industria vienen gobernadas por un sistema de control numérico computarizado (CNC) genérico que trabaja con gran cantidad de señales y que se comunica con los sensores y actuadores de la máquina a través de un cuadro de maniobra. En muchos casos este cuadro suele ser diseñado por el propio fabricante de la máquina (distinto, generalmente, al fabricante del CNC) y que, al no ser experto en tareas de diseño electrónico, recurre a cuadros de maniobra casi enteramente eléctricos, con la mayoría de las funciones lógicas implementadas de forma discreta a base de relés. Esta solución implica un esfuerzo desmesurado en los trabajos de cableado de este tipo de máquinas, así como en las tareas de diagnóstico y reparación de averías.

En este trabajo se presenta un sistema de control electrónico que sustituye tanto a la vieja electrónica de este tipo de cuadros, como a todos los relés que en ellos se encuentran. Este sistema, probado en una máquina de corte por plasma y oxigás, permite simplificar el cuadro de maniobra y reducir grandemente el cableado de la máquina, con notables ventajas de coste, montaje y mantenimiento.

Palabras clave: máquina de corte por plasma/oxigás, CNC, electrónica de control, reducción de cableado de maniobra.

1. INTRODUCCIÓN

La investigación en la automatización de máquinas de control numérico computarizado (CNC), realizada tanto en la industria como en las universidades durante décadas, está basada en la creencia de que sus resultados repercutirán en la mejora de la calidad de la producción, reducción de costes, fiabilidad, etc. [1]. La automatización en máquinas de CNC puede ser aplicada a la fabricación tanto de grandes como de pequeños lotes. Además, dicha automatización puede permitir la sintonización autónoma de ciertos parámetros (velocidad, profundidad de corte, etc.) que permitan incrementar el rendimiento de la máquina de forma sustancial en lo que se refiere a calidad del acabado superficial o del corte, tolerancias, ciclos de trabajo, optimizaciones de tiempos, etc.

La tendencia actual es la de incrementar la “inteligencia” de las máquinas de CNC, no sólo en el software de control numérico,

sino también en la parte de maniobra. Esto se consigue introduciendo procesadores digitales programables [2] [3] tales como microprocesadores, microcontroladores, PLCs, FPGAs, etc. Hoy día la tecnología permite construir procesadores cada vez más rápidos, capaces de ejecutar decenas de millones de instrucciones por segundo, a precios muy razonables. Esta capacidad juega un papel muy importante en el control de procesos, permitiendo una gran precisión y repetitividad en la ejecución de tareas. Además, ha permitido utilizar nuevos sistemas de comunicación serie, en detrimento de los sistemas paralelo. Como principal ventaja de aquellos frente a estos está el ahorro de cableado, con la consiguiente reducción de costes, facilitando también una estandarización en lo que a comunicaciones serie se refiere. Esta estandarización ha propiciado que multitud de fabricantes de microelectrónica hayan sacado al mercado gran diversidad de soluciones integradas para comunicación serie, contribuyendo a la reducción de precios y a la expansión mundial de dichos estándares. Muchos fabricantes de procesadores proporcionan bibliotecas software para el establecimiento de protocolos de comunicación serie, lo que facilita enormemente la tarea a los desarrolladores de sistemas de control.

En lo referente a máquinas de corte, el sistema de CNC suele estar basado en soluciones comerciales genéricas muy potentes, capaces de trabajar con gran cantidad de señales de entrada y salida para la gestión de los sensores y actuadores. Esta comunicación no es directa, sino a través de un cuadro, o armario, de maniobra, donde se realizan funciones lógicas y de acondicionamiento de señales. Este cuadro suele estar construido por el propio fabricante de la máquina (distinto, generalmente, al fabricante del CNC) y que, al no ser experto en tareas de diseño electrónico, recurre a diseños casi enteramente eléctricos, con la mayoría de las funciones implementadas de forma discreta a base de relés. Esto implica una gran complejidad del cableado, que crece a medida que aumenta el tamaño y funcionalidad de la máquina, dificultando grandemente la actualización de las funciones del armario de maniobra y haciendo muy arduo el diagnóstico y reparación de averías. El coste de la mano de obra que realiza estas funciones será, en consecuencia, también muy elevado.

Las razones mencionadas anteriormente hacen que se plantee un nuevo enfoque que permita solventar los inconvenientes de las arquitecturas tradicionales adoptadas por los fabricantes de maquinaria con CNC. La tendencia [4] es la de incorporar buses de comunicaciones que permitan simplificar dichas arquitecturas con el objetivo básico de aumentar la competitividad. En [5] se presenta una revisión de la evolución sufrida en máquinas de control de procesos, con una clara tendencia hacia sistemas de control distribuidos comunicados por buses. En [6] se hace referencia a arquitecturas basadas en multiprocesadores (como la que se presenta en este trabajo), basadas en un PC industrial con armarios de maniobra con PLC's y comunicación mediante buses de campo tanto estándares como propietarios (SERCOS, Ethernet, CAN, etc.). [7] presenta un modelo de simulación virtual de una máquina CNC real con el fin de estudiar el sistema de control de trayectorias antes de ser implantado en la máquina. Todos estos estudios describen los sistemas CNC desde el punto de vista del control de movimiento (generación y seguimiento de tra-

yectorias), dejando a un lado las arquitecturas utilizadas para las operaciones de maniobra que complementan el sistema de control de la máquina. De hecho, es difícil encontrar referencias en este último campo.

Se presenta aquí una nueva arquitectura de control para armarios de maniobra. No se incluye, por no ser el objeto del trabajo, la parte de gestión del movimiento de la máquina a través de los motores y sus drivers, que son responsabilidad directa del PC (sobre el que corre un software CNC propietario). El trabajo se centra en mejorar la parte de maniobra que conecta los sensores y actuadores con el PC. La arquitectura planteada está basada en sencillos buses industriales de comunicación y tarjetas "inteligentes", adaptada a las necesidades del fabricante de maquinaria con CNC. El objetivo primordial es el de simplificar los cuadros de maniobra y reducir el cableado interno de las máquinas, para así obtener ventajas competitivas como las relacionadas con el coste, el montaje y el mantenimiento de dicha maquinaria.

El trabajo ha sido financiado por la empresa *Praxair Soldadura S.L.* que, mediante la firma de varios convenios, ha dado respaldo al desarrollo de las soluciones que aquí se presentan.

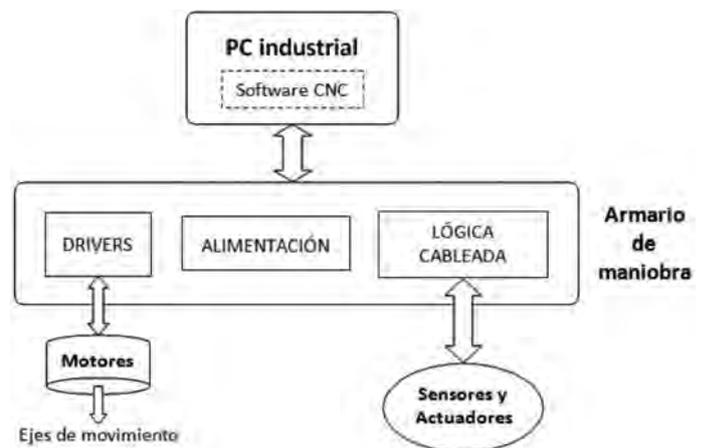


Fig. 1: Arquitectura tradicional de una máquina de CNC para corte por plasma y oxigás

2. ARQUITECTURA DE CONTROL

2.1. ARQUITECTURA DE UNA MÁQUINA DE CONTROL NUMÉRICO

Como plataforma de ensayo para el desarrollo del sistema de control propuesto se ha empleado una máquina de corte por plasma y oxigás modelo *Avant30* de la empresa *Praxair Soldadura, S.L.* A grandes rasgos, la arquitectura de una máquina de este tipo es la que se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 1.

La máquina consta de un controlador maestro formado por un ordenador industrial de tipo PC, con pantalla táctil y software de control numérico (corriendo sobre *Windows Embedded*) que gestiona la fabricación de las piezas de forma autónoma. El ordenador, a través de unas tarjetas de entrada y salida situadas en su propio chasis, se comunica con un armario de maniobra donde se encuentran los dispositivos de

control de movimiento de la máquina (drivers) y las circuiterías de alimentación y control (lógica cableada) que gobiernan todos los sensores y actuadores de la máquina.

La máquina dispone de los correspondientes motores para ejecutar los movimientos en cuatro ejes (Figura 2) que son gobernados desde sus respectivos drivers. Los ejes X y XX son paralelos y permiten mover el puente de la máquina adelante y atrás. El uso de dos motores evita errores de alineamiento entre ambos ejes. Sobre el puente se montan las antorchas de plasma y oxigás, que pueden moverse a izquierda y derecha (eje Y) o verticalmente (eje Z). El PC controla directamente los drivers, sin pasar por la lógica cableada, excepto el de altura, que tiene un control propio implementado en el armario de maniobra.

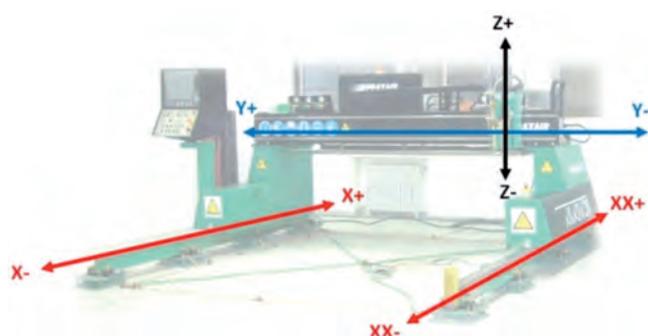


Fig. 2: Ejes de movimiento de la máquina de CNC usada como banco de ensayo

La lógica de control situada en el armario de maniobra está formada por una serie de placas electrónicas y circuitos eléctricos contruidos a base de relés que permiten realizar las funciones lógicas necesarias para que el PC pueda realizar el gobierno de la máquina (lógica cableada). Con ella se hace de interfaz entre el PC y los sensores y actuadores de toda la máquina. Toda la información, tanto de entrada como de salida, que genera esta lógica de control viaja en formato paralelo a través de una serie de macedados de cables que unen el armario de maniobra con el propio PC industrial. La Figura 3 muestra el armario con los drivers, la alimentación y el sistema eléctrico de maniobra original (lógica cableada), cuya sustitución y rediseño es el objetivo del presente trabajo.

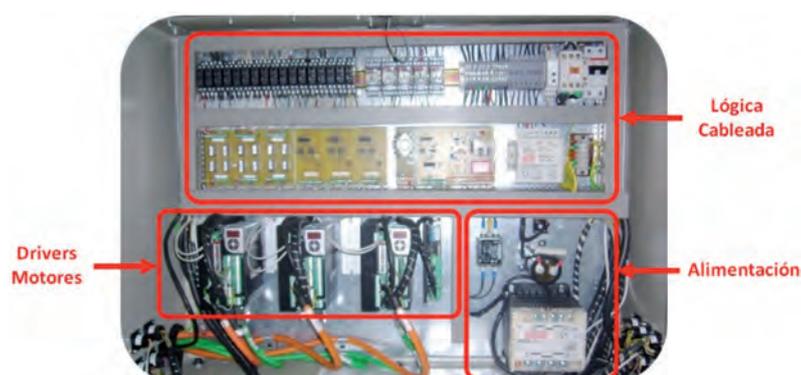


Fig. 3: Armario de maniobra original. Sólo la lógica cableada es la que ha sido sustituida y mejorada

2.2. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

La electrónica del armario de maniobra debe diseñarse de forma que proporcione una gran fiabilidad de funcionamiento. Debe ser fácilmente reparable para que, en caso de avería, el cliente tenga parada el menor tiempo posible su línea de producción. Su arquitectura debe estar concebida de una manera sencilla y modular, que facilite su construcción, programación, funcionamiento y la posibilidad de incorporar futuras ampliaciones. Por último, debe ser asequible en precio, para que permita una mayor competitividad a la empresa que la produce.

La lógica de control que normalmente montan los armarios de maniobras es de tipo cableado, es decir, que sus funciones están realizadas en forma de circuitos eléctricos, en su mayoría con relés electromecánicos. Un cambio en dichas funciones lógicas requeriría un cambio de cableado o, incluso, una reestructuración de la circuitería. Un sistema de estas características requiere de un gran esfuerzo de fabricación para evitar que durante su montaje se cometan fallos de cableado. Además, cuando este crece las probabilidades de error se multiplican. Obviamente, la ampliación de las funciones de una máquina como ésta, implica un cambio o reestructuración del armario de maniobra, haciendo el cableado aún más denso, lo que agrava grandemente los problemas anteriormente comentados. Todo esto lleva aparejado otra desventaja importante, y es que el diagnóstico de una avería se hace muy complejo, por lo que la visita de un técnico a las instalaciones del cliente se puede alargar en el tiempo, redundando en un aumento en el coste del mantenimiento.

En el diseño se ha de procurar reducir al máximo el uso de relés electromecánicos, especialmente para la realización de algoritmos de control, pues presentan ciertos inconvenientes que están relacionados con la velocidad, consumo de energía, fiabilidad, coste y volumen de espacio requerido, sobre todo al compararlos con otros dispositivos electrónicos fabricados en semiconductores (microcontroladores, transistores, memorias, etc.). Un relé electromecánico es un elemento de conmutación extremadamente lento, debido a su propia naturaleza mecánica, y su fiabilidad y vida útil son más reducidas debido al deterioro paulatino de los contactos. Además, en muchas ocasiones, el consumo es excesivo ya que hay que excitar una bobina. En cuanto a su precio, se puede decir que es también excesivo, teniendo en cuenta las prestaciones tan limitadas que presenta a la hora de realizar funciones lógicas de control. Su uso masivo como elementos lógicos hace que el espacio requerido para albergarlos dentro del armario de maniobra sea bastante grande (aumentando ostensiblemente el cableado), lo que, unido a su superior consumo, hace que las fuentes de alimentación para esta circuitería sean también desproporcionadas (repercutiendo negativamente en el precio).

Por otro lado, el armario de maniobra se suele ubicar cerca de los sensores y actuadores para evitar la degradación de las señales, mientras que el ordenador industrial suele estar cerca del operario, en zona segura (Figura 4). Esto implica tender

grandes macedos de cables, de varios metros de longitud, que unan el armario y el ordenador industrial, lo que conlleva un alto coste en hilos de cobre y conectores. Además, cuanto mayor es el número de señales empleadas, mayor es el esfuerzo de cableado de la máquina, ya que la transmisión de señales suele hacerse en paralelo. Por último, hay que tener en cuenta también que estas señales, digitales, suelen ser normalmente del tipo *single-ended* (o referenciadas a masa), lo que significa que son bastante sensibles al ruido electromagnético. Este efecto es más perjudicial a mayor velocidad de conmutación y longitud de los cables.

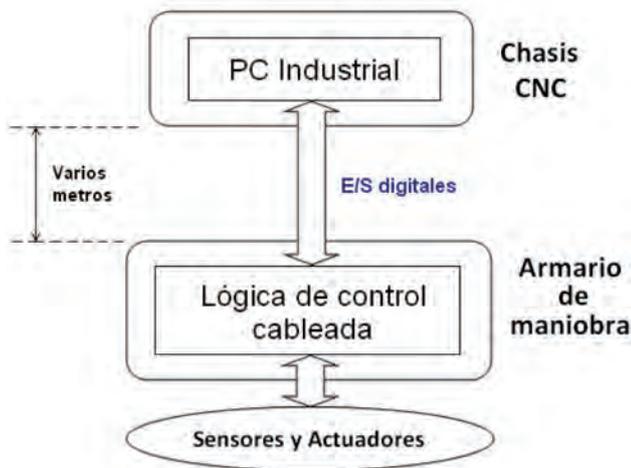


Fig. 4: Estructura de comunicación paralela entre el controlador CNC y el armario de maniobra

2.3. ARQUITECTURA PROPUESTA

2.3.1. Buses de comunicación serie

La arquitectura propuesta se basa en el uso de buses de comunicación serie, pues presentan ventajas claras frente a la comunicación paralelo [8]. Para grandes distancias el envío de múltiples señales en paralelo resulta caro debido a la multiplicidad de hilos. Por contra, existen buses serie que emplean muy poca cantidad de hilos, con un altísimo grado de estandarización, lo que permite que haya multitud de productos de diferentes fabricantes en el mercado a precios muy competitivos. Además, en muchos buses serie se emplean a menudo técnicas de reducción de ruido, poco habituales en comunicaciones paralelo, que ayudan a mejorar las velocidades de transmisión.

2.3.2. ¿Autómata programable o microcontrolador?

El protocolo empleado en los buses serie impone el uso de controladores digitales que manejen dicha información. Entre las opciones posibles sobresalen la utilización de un PLC [9] o un microcontrolador [10], ambos con sus propias ventajas e inconvenientes, e incluso una solución mixta que incluya ambos dispositivos [11]. La elección se hace, en parte, según la experiencia y el conocimiento del diseñador en cada uno de los campos, el presupuesto disponible y las necesidades técnicas.

Aunque la opción del PLC es perfectamente válida, la solución escogida finalmente es la basada en microcontrolador, ya que, para este caso concreto, se tienen ciertas ventajas, debidas, entre otras, a las siguientes razones:

- Con PLCs el diseñador debe atenerse a los módulos de expansión que el fabricante proporcione, pudiendo quedar desaprovechados. Con el microcontrolador se puede diseñar el sistema totalmente a medida, gracias a que la amplísima gama de microcontroladores (muy superior a la de PLCs) permite elegir el modelo más adecuado a la aplicación, sin derrochar recursos.
- El ciclo de ejecución o scan del PLC (de pocos milisegundos) impide controlar adecuadamente señales que varíen muy rápidamente, requiriendo a veces módulos específicos [12]. El microcontrolador, al no tener esta limitación, puede trabajar a velocidades de procesamiento muy elevadas, pudiendo reaccionar inmediatamente a cambios en el entorno.
- Los PLCs se programan en lenguajes propietarios, lo que obliga a comprar el software del fabricante, mientras que en los microcontroladores, aunque el lenguaje ensamblador es también propio de cada fabricante, éstos suelen proporcionarlos de forma gratuita. Los códigos no son exportables directamente de un PLC a otro, cosa que es más fácil entre microcontroladores gracias al uso del lenguaje ANSI C/C++, considerado un estándar mundial. En un PLC la capacidad de elaboración de algoritmos complejos es reducida, no así en un microcontrolador.
- Las herramientas de desarrollo de microcontroladores suelen ser asequibles en precio, en muchos casos gratuitas. Además, el fabricante proporciona potentes bibliotecas de funciones perfectamente testadas y depuradas que facilitan la programación del microcontrolador, reduciendo el tiempo de desarrollo.
- Las posibilidades de miniaturización del sistema con microcontrolador son mucho mayores que con un PLC, en parte porque el sistema se puede desarrollar a medida.
- Un sistema con microcontrolador resulta generalmente mucho más barato que uno con PLC debido al elevado precio de este último y a que los fabricantes integran un gran número de opciones y funciones que en muchas aplicaciones no se necesitan, y éstas, aunque no se usen, hay que pagarlas [13].

2.3.3. Estructura de control

La integración de buses serie y microcontroladores en el sistema que gestiona las operaciones de maniobra se ha realizado de acuerdo a una arquitectura de dos niveles (Figura 5). En el exterior se tiene una comunicación de larga distancia entre el chasis del ordenador industrial y el armario de maniobra, llevada a cabo mediante un bus serie asíncrono. Internamente se tienen las comunicaciones de corta distancia entre circuitos integrados de una misma tarjeta de circuito impreso o entre

varias tarjetas (realizada mediante bus serie síncrono).

Las entradas y salidas del ordenador industrial son gestionadas por una tarjeta ubicada dentro de su chasis. Así se consigue recortar las longitudes de macedados paralelos de cables de varios metros a pocos centímetros, reduciéndose también el número y/o el precio de los conectores, pues las conexiones son internas. Esta tarjeta está gobernada por un microcontrolador que hace de puente entre el ordenador industrial y el armario de maniobra. Su misión es doble: leer todas sus entradas (salidas para el ordenador industrial), codificarlas y enviar dicha información al armario de maniobra y, por otro lado, recibir datos del armario de maniobra, decodificarlos y alterar sus salidas (entradas del PC industrial) de acuerdo con la información recibida. Este proceso de lectura de las entradas y actualización de las salidas se lleva a cabo a través de un bus serie I²C [14].

En el armario de maniobra se emplea una estructura similar, utilizando un microcontrolador para la comunicación con el ordenador industrial y para la gestión de los sensores y actuadores repartidos por la máquina. Las entradas y salidas que conectan con los sensores y actuadores son gestionadas también desde una interfaz por bus I²C.

El uso de este bus interno se hace necesario por el elevado número de entradas y salidas, (imposible hacer frente a todas ellas con un solo microcontrolador). Esto obliga a utilizar diversos circuitos integrados cuya forma más económica y fácil de comunicación es mediante interfaz serie. De esta forma, además, se gana en modularidad y capacidad de expansión, pues se podrían incorporar fácilmente nuevas tarjetas de control a la arquitectura existente, sin necesidad de grandes cambios en el cableado y el software del sistema. Esto lleva aparejado una importante componente económica, pues los fabricantes podrían ofertar al mercado diferentes modelos de máquinas que compartan una misma arquitectura común.

Además, el nivel de stocks se podría reducir, pues todos los modelos compartirían componentes básicos iguales.

La elección del bus I²C, muy empleado en la industria [15-16], como elemento de unión entre los circuitos y tarjetas se debe a su gran velocidad de comunicación, bajo consumo, gran rango de temperatura de funcionamiento y sencillez del protocolo. Permite obtener una gran reducción de espacio y precio, gracias al uso de sólo dos hilos y a la incorporación de los interfaces en los propios chips. Se pueden añadir o retirar dispositivos sin afectar al resto, lo que beneficia a la modularidad y flexibilidad de la solución propuesta. Todas estas ventajas han sido aprovechadas en el diseño de la lógica de control del armario de maniobra de la máquina de corte, donde, si se desea, se pueden incluir nuevas tarjetas, o cambiar las existentes por versiones mejoradas, manteniendo intactas el resto. El diseño final resulta compacto y sencillo, reuniendo todas las ventajas anteriormente mencionadas.

2.3.4. Circuitería de interfaz con el ordenador industrial

Para la comunicación con el ordenador industrial se ha dispuesto una tarjeta cuyo diagrama de bloques se muestra en la Figura 6. Su misión es, por un lado, la de recibir la información del PC industrial y transmitirla al armario de maniobra a través del bus serie asíncrono y, por otro, recibir información de este bus y transmitirla a las salidas que conectan con el ordenador.

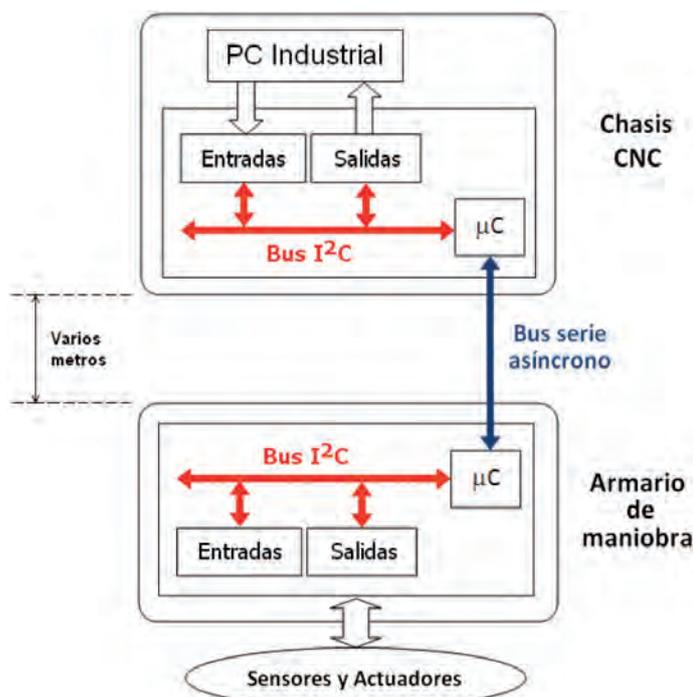


Fig. 5: Estructura propuesta con buses de comunicación serie

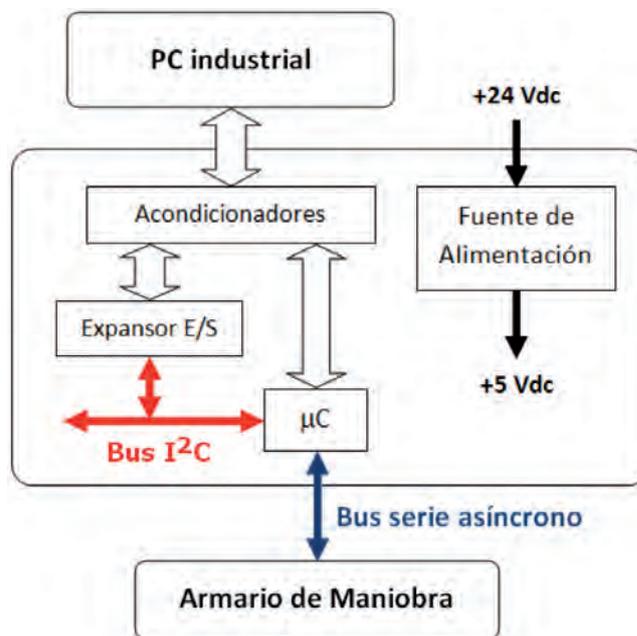


Fig.6: Diagrama de bloques de la tarjeta de interfaz entre el PC industrial y el armario de maniobra

El componente principal es un microcontrolador con capacidad para la comunicación serie con el armario de maniobra, así como para la comunicación por bus I²C. Ciertas señales son manejadas directamente por el microcontrolador, el resto, debido al reducido número de puertos de que dispone, es tratado mediante un expansor de entradas y salidas que es gobernado a través del propio bus I²C.

Todas las entradas y salidas disponen de acondicionadores para adaptarse a las necesidades de comunicación con el ordenador industrial. Para el caso de las entradas se han dispuesto filtros de ruido y antirrebotes, ya que muchas de las señales recibidas son de tipo electromecánico: contactos de relé, pulsadores o interruptores.

La fuente de alimentación está basada en reguladores conmutados de alta eficiencia, con capacidad para la protección frente a cortocircuitos, sobrecorrientes e inversión de polaridad. Su objetivo es proporcionar una tensión continua de +5V, estabilizada y filtrada, a los componentes lógicos de la electrónica de la tarjeta. La entrada se toma de la alimentación de +24V que el propio chasis del ordenador proporciona.

2.3.5. Circuitería de control del armario de maniobra

Este sistema sustituye la lógica cableada original por una arquitectura basada en microcontrolador. Como el número de señales (en su mayoría digitales) procedentes de los sensores y actuadores que estas máquinas manejan es muy grande, será necesario disponer de expansores de entrada y salida que permitan al microcontrolador procesar todas las señales disponibles. Además, como uno de los objetivos del trabajo es diseñar una arquitectura modular ampliable que sea aplicable con facilidad a otras máquinas más sofisticadas, se ha desa-

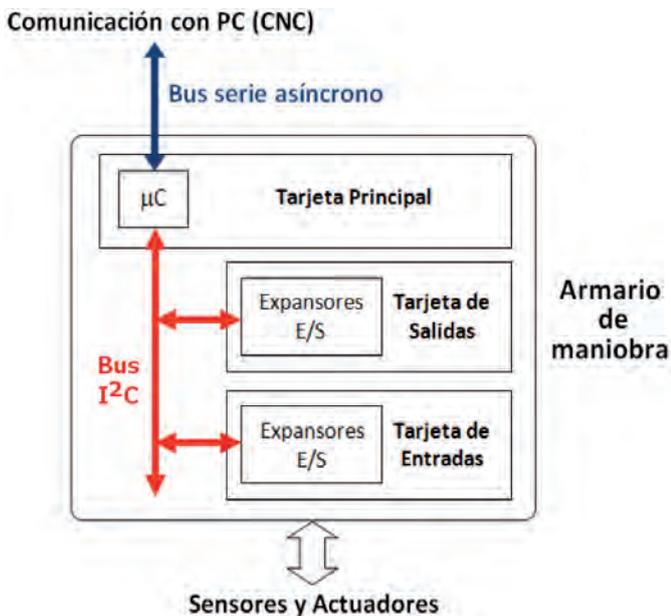


Fig.7: Estructura de la lógica de control del armario de maniobra modular y expandible mediante bus I²C

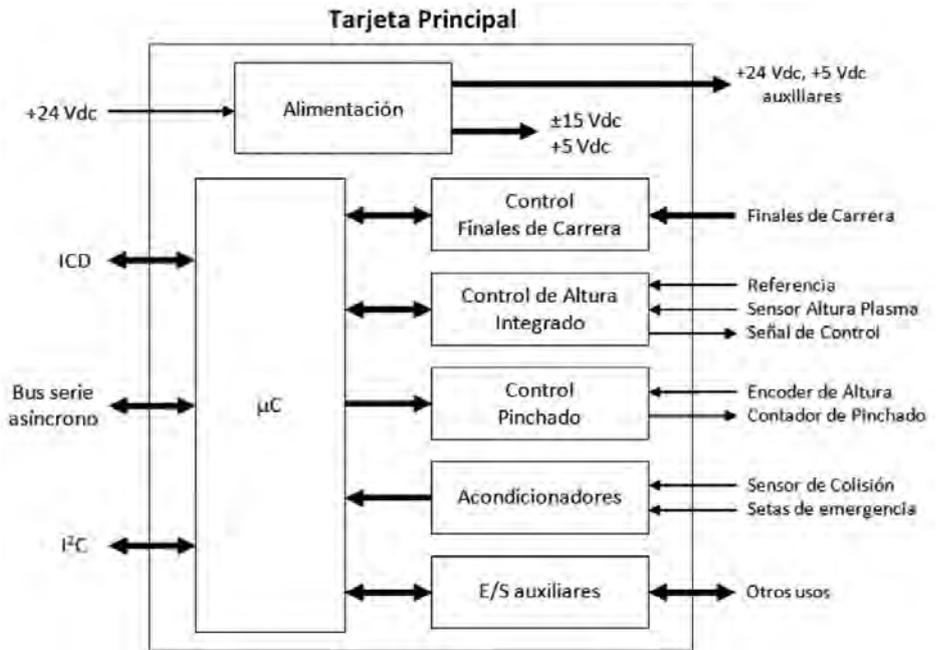


Fig.8: Diagrama de bloques de la tarjeta principal de la lógica de control del armario de maniobra

rollado una estructura de este tipo formada por varias tarjetas con diferentes funcionalidades conectadas mediante bus I²C (Figura 7).

La tarjeta principal (Figura 8) dispone de un microcontrolador maestro de 8 bits de altas prestaciones y bajo precio que gestiona el funcionamiento del armario de maniobra, incluyendo todas las operaciones de corte. Esta tarjeta incorpora una gran cantidad de funciones como, por ejemplo, la gestión de las tarjetas de E/S mediante I²C, la comunicación con el PC industrial por bus serie asíncrono, el control del proceso de pinchado, el arranque adecuado de todos los sistemas de la máquina, el control de altura del plasma, las paradas de emergencia (bien por colisión de la antorcha o por activación de las setas de emergencia), el disparo del plasma, el homing (proceso que permite establecer el origen de coordenadas), etc. Todas estas funciones son gestionadas por el microcontrolador maestro, excepto el control de altura, que se ha implementado en software en un microcontrolador esclavo. De esta forma se libera al maestro de la parte más exigente en carga computacional.

El bloque más importante de la tarjeta principal es el del control de altura del corte por plasma, gestionado por el microcontrolador esclavo antes mencionado y dotado con menores prestaciones que el maestro que gestiona toda la tarjeta. La altura la determina el equipo generador de plasma midiendo la diferencia de potencial entre la pieza de trabajo y la boquilla de la antorcha. El controlador garantiza que la antorcha esté siempre a la misma distancia de la plancha metálica que está siendo cortada, con el fin de evitar la pérdida de calidad en el corte de la pieza. Para el oxicorte se emplea un controlador específico (que no forma parte de la arquitectura modificada) al que se conecta directamente un sensor de altura capacitivo. Como ambos sistemas son capaces de gestionar el conjunto driver-motor de altura, el microcontrolador maestro envía

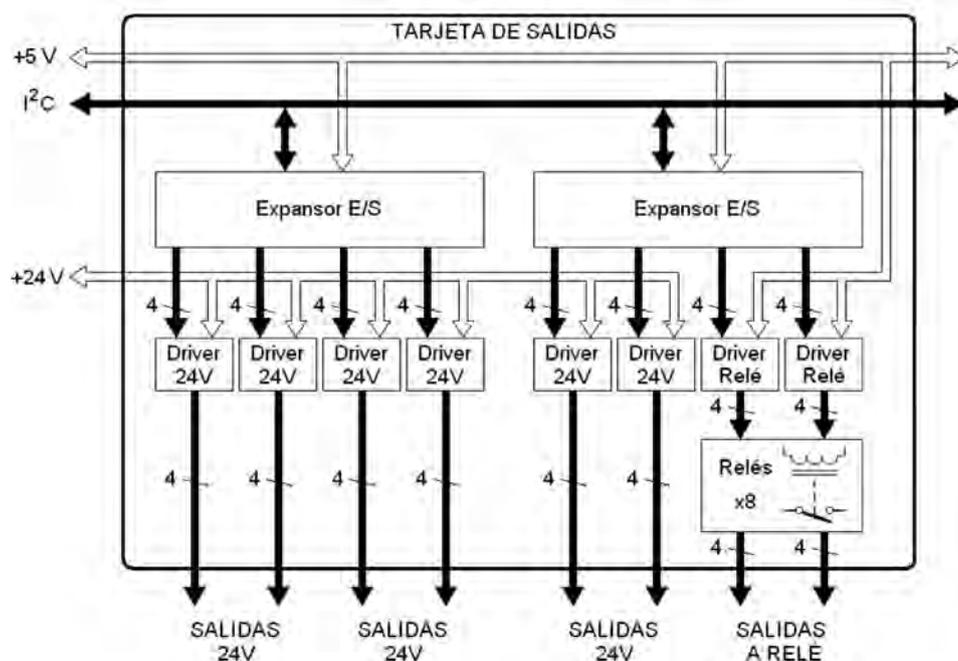


Fig.9: Diagrama de bloques de la tarjeta de salidas de la lógica de control del armario de maniobra

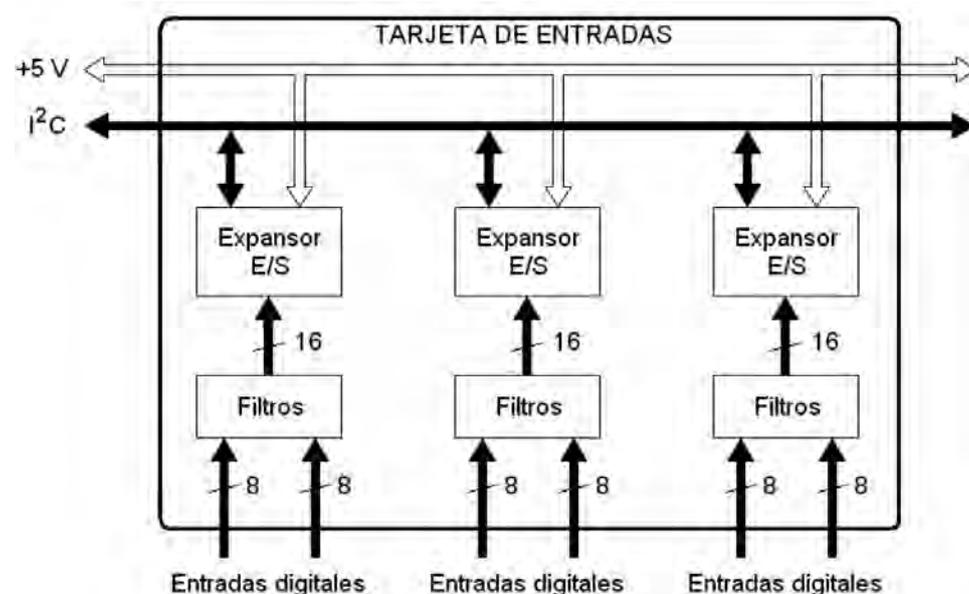


Fig.10: Diagrama de bloques de la tarjeta de entradas de la lógica de control del armario de maniobra

(mediante el bus I²C) un comando a la tarjeta de salida para que se seleccione uno u otro controlador en función del tipo de corte elegido desde la consola frontal del PC industrial.

El resto de bloques lo forman una fuente conmutada de 5V y 2A, que alimenta las tres tarjetas del armario, y los circuitos de gestión de los principales sensores de la máquina (seta de emergencia, finales de carrera, sensores de colisión y pinchado, etc.). Una descripción más detallada se puede encontrar en [17].

La tarjeta de salida (Figura 9) dispone de varios módulos expansores que se comunican mediante I²C con el microcon-

trolador de la tarjeta principal. Han sido configurados para ser usados como salidas digitales (de tipo TTL), sin embargo, muchas de las señales de la máquina requieren ser adaptadas a las necesidades de los actuadores y resto de módulos, por ello se hace necesario el uso de acondicionadores (*drivers*). Estos permiten adaptar la lógica TTL a voltajes distintos, por ejemplo a 24V, o también para su uso con relés, ya que ciertos módulos de la máquina y del PC industrial requieren como señales de entrada cierres de contactos.

Por último, la tarjeta de entradas (Figura 10) también dispone de varios expansores para la comunicación por I²C, configurados para su uso como entradas digitales. En todas las entradas digitales se ha optado por utilizar filtros de tipo paso bajo (circuitos con resistencias y condensadores) con el fin de limitar los rebotes y los ruidos presentes en este tipo de señales.

3. RESULTADOS

La arquitectura de control propuesta ha sido sometida a multitud de pruebas de funcionamiento, obteniéndose un resultado altamente satisfactorio, pues sustituye con plenas garantías la circuitería original basada en lógica cableada. Esta afirmación se basa en el hecho

de que la máquina ha sido sometida a todos los tipos de cortes soportados desde la consola de operario y se han comparado los resultados con los de la arquitectura original.

En primer lugar, se modificó la antorcha de la máquina para realizar dibujos de piezas de calibración sobre un papel dispuesto sobre la mesa de corte, con el fin de comprobar el correcto funcionamiento del nuevo sistema. El test consiste en dibujar una serie de figuras geométricas, comprobando los puntos de calibración y de paso. No hubo diferencia, en cuanto a desviaciones y errores, con el sistema original. Al no haber realizado ningún cambio en los algoritmos de seguimiento de

trayectorias, ya que se usó el software de CNC propietario que originalmente disponía la máquina, no era de esperar una mejoría en cuanto a precisión y errores de perfil se refiere. Tan sólo se esperaba que el nuevo sistema de maniobra funcionara al menos como el original.

Posteriormente, se sometió a la máquina a todos los tipos de corte soportados, tanto con plasma (el caso más habitual) como con oxigás, ya fuese en modo automático como manual, con control de altura manual o automático, etc. De esta forma quedaba comprobado que la nueva arquitectura de maniobra operaba con éxito. Durante las primeras pruebas se realizaron retoques en el software de los microcontroladores de las nuevas tarjetas, con el fin de depurar fallos de funcionamiento. Finalmente, se pudo comprobar en diferentes tipos de piezas (Figura 11), que la precisión y la capacidad operativa de la máquina no se vio mermada con respecto al sistema anterior, resultando ser muy fiable.



Fig. 11: Algunas piezas cortadas por plasma con la máquina operando con la nueva arquitectura

Por otro lado, se ha conseguido un ahorro considerable en el cableado, tanto dentro del armario de maniobra como en el resto de la máquina. El ahorro también es de espacio (Figura 12), ya que todas las funciones lógicas, que anteriormente



Fig. 12: Disposición de las tarjetas prototipo en el armario de maniobra

estaban realizadas por una lógica cableada basada en relés, han sido integradas en el software de los microcontroladores. Compárese la Figura 3 (arquitectura original) con la Figura 12 (arquitectura modificada).

Con la nueva arquitectura de maniobra se han conseguido grandes beneficios. El empleo de microcontroladores permite obtener ventajas de diseño: tamaño reducido, robustez (pues están diseñados para ambientes industriales), bajo coste (muchas de las herramientas de desarrollo son gratuitas y los propios microcontroladores son dispositivos de costo inferior al de un solo relé de maniobra), etc.

El sistema es modular, porque es posible, gracias a los buses de comunicación empleados, añadir, quitar y sustituir fácilmente las tarjetas que forman el sistema. Un simple cambio de software sería suficiente para adaptarse a la nueva configuración. Esto puede permitir al fabricante sacar al mercado diversos modelos de máquinas manteniendo una arquitectura base común, fácil de mantener (se reducen los stocks al compartir todas las máquinas la misma base) y actualizar.

El nuevo sistema es más fácil de mantener porque se ha reducido el número de componentes y, por tanto, también el cableado. Esta reducción proviene, fundamentalmente, de dos vías. Por un lado, el hecho de haber implementado en software muchas de las funciones que anteriormente estaban realizadas mediante la lógica cableada ha permitido eliminar casi todos los relés de la arquitectura original. Tan sólo se han mantenido unos pocos que sirven de adaptación a dispositivos especiales (electroválvulas de corriente alterna, relés maestros de alimentación para circuitos de alto consumo de corriente alterna, etc.). Por otro lado, al haber empleado buses de comunicaciones (con pocos hilos) se ha evitado tener que usar señales adicionales por cada una de las funciones que deban ser transmitidas de un lado a otro de la máquina. Los numerosos macedos de cables (con más de 50 hilos) que conectaban la lógica cableada con el PC industrial han sido sustituidos por un único bus de tres hilos.

El control de altura analógico de tipo P que venía con la arquitectura original ha sido sustituido por un control digital PID basado en microcontrolador [17]. Al disponer de este elemento reprogramable se pueden implementar diferentes algoritmos y estrategias de control sin necesidad de alterar el hardware.

Se han empleado técnicas convencionales de reducción de ruido (filtros, condensadores de desacoplo, etc.) para garantizar la robustez del sistema.

Con la nueva estructura modular reprogramable, ante una posible avería del sistema, la solución más sencilla consiste en sustituir la tarjeta causante del fallo. En el mejor de los casos, una simple actualización de software puede ser suficiente para que el error no se vuelva a reproducir. En la arquitectura original, al poseer una estructura de control cableada (frente a una programada) los inconvenientes proceden de la dificultad de averiguar el elemento (generalmente relé) causante del malfuncionamiento.

Frente a las ventajas de la nueva arquitectura cabe mencionar algunos inconvenientes. Por ejemplo, es necesario nuevo personal especializado tanto para el diseño como reparación de los equipos. Por otro lado, la arquitectura es dependiente del sistema CNC empleado, en este caso uno de tipo propieta-

rio, ya que la interfaz con el PC industrial se hace por medio de un panel de entradas y salidas digitales. Sin embargo, esto puede ser solventado con el uso de un CNC que incorpore buses de comunicaciones estándares.

4. CONCLUSIONES

La arquitectura que aquí se presenta ha sido llevada a cabo teniendo en cuenta criterios de sencillez, flexibilidad del diseño, economía de espacio y precio, fácil disponibilidad de componentes, rapidez de prototipado, calidad y fiabilidad. La naturaleza digital y la capacidad de trabajar en modo incrustado de los microcontroladores empleados hacen que el sistema sea robusto y fiable, como así lo atestiguan las pruebas llevadas a cabo. Ha habido una mejora de la fiabilidad y de la flexibilidad en todo el sistema que gestiona los procesos de corte, conseguida, fundamentalmente, por la elección de soluciones sencillas de diseño, basadas en el uso de sistemas empotrados reprogramables y comunicaciones por buses serie. Se ha ganado en capacidad de expansión del diseño gracias, sobre todo, al uso de esa arquitectura de buses serie. Además, estas soluciones permiten mejorar problemas de fabricación, puesta en marcha, mantenimiento y costes.

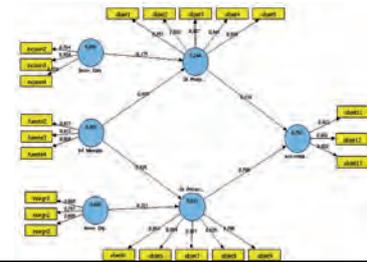
AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la participación de la empresa *Praxair Soldadura, S.L.* en la financiación, disponibilidad de materiales e información, gracias a la cual ha sido posible la realización del presente trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Shih-Jer Huang, Cheng-Fa Lee, Servo-drive systems for milling machine retrofit application, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 33, Issue 3, June 1993, Pages 449-463, ISSN 0890-6955, [http://dx.doi.org/10.1016/0890-6955\(93\)90051-U](http://dx.doi.org/10.1016/0890-6955(93)90051-U).
- [2] K.D. Oldknow, I. Yellowley, Design, implementation and validation of a system for the dynamic reconfiguration of open architecture machine tool controls, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 41, Issue 6, May 2001, Pages 795-808, ISSN 0890-6955, [http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(00\)00109-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00109-7).
- [3] R. Ramesh, M.A. Mannan, A.N. Poo, Tracking and contour error control in CNC servo systems, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 45, Issue 3, March 2005, Pages 301-326, ISSN 0890-6955, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmactools.2004.08.008>.
- [4] R. Krafting. "Digitally networked servos drive two new machines". *Design News. Motion Control Supplement*, April 9, 2001.
- [5] K.F. Martin, A review by discussion of condition monitoring and fault diagnosis in machine tools, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 34, Issue 4, May 1994, Pages 527-551, ISSN 0890-6955, [http://dx.doi.org/10.1016/0890-6955\(94\)90083-3](http://dx.doi.org/10.1016/0890-6955(94)90083-3).
- [6] López de Lacalle, L.N. y Lamikiz, A. "Machine Tools for High-Performance Machining". Springer. 2009.
- [7] Chi-Ho Yeung, Yusuf Altintas, Kaan Erkorkmaz, Virtual CNC system. Part I. System architecture, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 46, Issue 10, August 2006, Pages 1107-1123, ISSN 0890-6955, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmactools.2005.08.002>.
- [8] N. Mathivanan. "PC-Based Instrumentation: Concepts and Practice". Prentice-Hall of India Private Limited. 2007.
- [9] S. Gordon and M. T. Hillery, "Development of a high-speed CNC cutting machine using linear motors". *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 166. p. 321-329.
- [10] C. Candiani, J. Luzuriaga, and D. Petrone. "Un CNC modular, multieje, apto para el comando de robots y sistemas especiales". V Jornadas Argentinas de Robótica (JAR'08). Bahía Blanca (Argentina). 12-14 noviembre 2008.
- [11] X. Zhou, B. Tan, B. Zhu, X. Peng, and Y. Pei. "CNC system of MKS1632 external cylindrical grinding machines based on embedded". *Proceedings of the Second International Symposium on Networking and Network Security (ISNNS10)*. Jingtangshan (P. R. China). April 2-4 2010. p. 262-266.
- [12] N. A. Ivanescu, T. Borangiu, S. Brotac, and A. Dogar. "Implementation of sequential function charts with microcontrollers". *Proceedings of the 15th Mediterranean Conference on Control and Automation*. Athens (Greece). July 27-29 2007.
- [13] R. Hoehn and S. M. Sbenaty. "Designing, building and testing a microcontroller based system for industrial applications". *Proceedings of the 2005 ASEE Gulf-Southwest Annual Conference*. 2005.
- [14] "I²C-Bus Specification and User Manual, Rev. 3". June 19, 2007. <http://www.nxp.com>.
- [15] J. M. Andújar, T. de Jesús Mateo, F. J. Aguilar y J. J. Chica. "Plataforma robótica controlada de forma remota mediante una red I²C de microcontroladores". XXVII Jornadas de Automática, Almería (España), 2006.
- [16] Changqing Cai. "The LPT Data Acquisition Card Design of the Front-Wheel Vehicle Positioning Test Equipment Based on the I²C Bus". *International Symposium on Intelligent Information Technology Application Workshops*, 2008. December 21-22 2008. p.753-756. doi: 10.1109/IITA.Workshops.2008.37
- [17] J. I. Suárez, M. A. Jaramillo, A. Marcos, E. Martínez de Salazar, "Mejora en la Electrónica del Control de Altura de una Máquina de corte por Plasma/Oxigás". *Actas del Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI 2011)*. 5-8 de julio, 2011. Badajoz (España). p. 549-554.

Determinantes de la orientación eco-innovadora en la industria cerámica española



ENVIRONMENTAL ECO-ORIENTATION DETERMINANTS AT THE SPANISH TILE INDUSTRY

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5835> | Recibido: 08/05/2013 • Aceptado: 11/09/2013

María del Val Segarra-Oña, Ángel Peiró-Signes

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA. ETSII.
 Dpto. de Organización de Empresas.
 Camino de Vera, s/n - 46022 Valencia. Tfno: +34 963 877000.
 maseo@omp.upv.es

ABSTRACT

• Actually, sustainability and innovation are key aspects of businesses' competitiveness. Knowing which are the aspects that influence the sustainable orientation when innovating, allow firms to take more efficient decisions, specially those involving R&D funds. The aim of this work is to empirically establish the environmental orientation of the ceramic industry determinants. In this paper, data retrieved from the PITEC (Spanish Innovation Panel) from 34 firms are modeled using the structural equation technique (EQS). Results show that among the different innovative typologies, process innovation is an important factor influencing firms' eco-innovative orientation. Moreover, we found out a positive relationship between eco-innovation activity and marked information sources coming from suppliers, clients, competitors and external organizations. Finally, we verify that the orientation towards product-innovation has no, significant influence, on companies' environmental orientation when innovating, which has important managerial implication.

• **Keywords:** Eco-innovation, sustainability, Spanish ceramic industry, PLS, PITEC.

RESUMEN

En la actualidad, la sostenibilidad y la innovación se erigen como aspectos clave en la competitividad empresarial. Conocer qué influye en la orientación eco-innovadora de las empresas supone disponer de una información que permita obtener una mayor eficiencia en las decisiones de inversión en I+D. El objetivo de este trabajo es analizar qué variables influyen en la orientación medioambiental de las empresas del sector cerámico al innovar. Se analizan 34 empresas utilizando un modelo de ecuaciones estructurales con datos del Panel de Innovación Tecnológica. De las distintas formas de innovación existentes, los resultados indican que la innovación en procesos influye en la orientación eco-innovadora de las empresas estudiadas. Además, constatamos la influencia positiva sobre la orientación medioambiental al innovar de la actividad innovadora previa y de la dependencia de la empresa de la información proveniente, de los competidores, clientes y proveedores y de agentes externos. Finalmente, verificamos que la orientación innovadora hacia la innovación en productos no influye de forma significativa en la orientación medioambiental de las empresas del sector cerámico cuando innovan, lo que tiene implicaciones de gestión relevantes.

Palabras clave: Eco-innovación, Sostenibilidad, Sector cerámico español, PLS, PITEC.

1. INTRODUCCIÓN

La relación entre la sostenibilidad medioambiental y la competitividad ha sido remarcada en estudios previos [1]. Desde entonces, los estudios en esta área intentan explicar la relación entre sostenibilidad y mejora en los resultados [2].

La necesidad de un marco analítico, teórico y regulatorio, está empujando a varios investigadores a trabajar intentando entender por qué algunas empresas están yendo más allá de lo establecido en la legislación medioambiental y cuáles son las características que determinan que estas empresas consideren el medio ambiente como una prioridad cuando innovan [3,4], dado que, en la actualidad, la eco-innovación, la actitud medioambiental o gestión medioambiental son variables cruciales que tienen que ser analizadas cuando hablamos de aspectos relacionados con el desarrollo sostenible [5,6].

Por otra parte, la presión social, las políticas públicas o la regulación medioambiental [7-9] están también orientando el conocimiento y la investigación en esta dirección. La eco-innovación se define como la innovación que reduce el impacto medioambiental.

Carrillo-Hermosilla y otros [10] compilaron 16 definiciones diferentes de eco-innovación, lo que apunta a que se trata aún de un concepto en estudio y multidisciplinar que se puede estudiar desde diferentes ángulos: aspectos sociales, política pública y regulaciones, beneficios económicos o estrategia y gestión, entre otros.

Con respecto a la eco-innovación, varios autores han identificado las variables que actúan como facilitadores y barreras, como la ausencia de capacidad de absorción o la disponibilidad de recursos humanos con educación superior [11], la madurez de la firma [12] o el nivel tecnológico del sector industrial [13]. Sin embargo, algunos aspectos todavía no han sido considerados, como aquellos que hacen referencia a las características particulares de cada sector.

La selección del sector cerámico como objeto de estudio se justifica atendiendo a su comportamiento líder en el conjunto de la economía española, siendo un ejemplo a seguir en términos de exportaciones y desarrollo tecnológico, así como a su apuesta por la sostenibilidad como aspecto generador de ventajas competitivas [14,15]. Tanto desde la *Asociación Española de Fabricantes de Azulejos y Pavimentos Cerámicos*, ASCER [16], como en CEVISAMA, la feria que reúne cada año en Valencia a los agentes implicados en el sector, se observa una clara apuesta por la sostenibilidad (como se puede ver en el apartado de novedades/destacados en las páginas web de estos organismos). A nivel nacional, el sector cerámico es el segundo exportador nacional. A nivel europeo, España es el segundo productor de baldosas cerámicas y, tras China e Italia, se sitúa en el tercer puesto en cuanto a exportaciones. El sector español de la cerámica produjo en 2010 más de 300 millones de m² de baldosas cerámicas, dando empleo directo a unos 16.200 trabajadores en empresas mayoritariamente PYMES y generando más de 5.000 empleos indirectos (ASCER, consultado 6/8/2013). Según, ASCER [16], el 65% de la facturación global corresponde a exportaciones y el resto de las ventas se destinan al mercado nacional. La industria cerámica española se posiciona como un sector clave en la recuperación de la economía española, al presentar superávit comercial y presentar una importante capacidad exportadora.

El sector cerámico español se encuentra concentrado geográficamente en la provincia de Castellón, (Alcora, Borriol, Onda, Nules y Castellón), conformando un *cluster* (17) donde se concentra más del 90% de la producción y se localizan más del 80% de las empresas del sector [16]. Este estudio se realiza con el fin de establecer los determinantes de la orientación medioambiental de las empresas del sector cerámico cuando innovan, como continuación de nuestros trabajos anteriores [18]. Así, primero, presentamos el marco conceptual del estudio y especificamos las hipótesis para, a continuación, describir la muestra utilizada, la metodología y presentar los resultados. Finalmente, se presentan las conclusiones, limitaciones y futuras líneas de investigación.

2. ESTADO DEL ARTE Y PLANTEAMIENTO DE HIPÓTESIS

La proactividad medioambiental y la innovación tienen impacto en la posición competitiva a nivel macroeconómico

de las empresas, transformando los mercados existentes y creando nuevos [19]. Sin embargo, los beneficios concretos que las empresas obtienen son objeto de estudio actual [20] de la misma manera que los determinantes de la orientación eco-innovadora son foco de atención de investigadores [21] y administraciones públicas [22].

De Marchi [23] estudió el comportamiento innovador de las empresas medido a través de la inversión en I+D, así como otros autores han subrayado que la eco-innovación está afectada positivamente por el tamaño y la orientación exportadora.

La legislación está provocando un rápido desarrollo de este campo de estudio [24]. Asimismo, hay que considerar los aspectos clave del giro “verde” de los negocios [25] y cómo los aspectos relacionados con la toma de decisiones, la estrategia empresarial, la legislación y la adecuación de la producción a las nuevas normas y actitudes sostenibles, se refleja en la industria cerámica española [14,15]. Carrillo-Hermosilla et al. [10] remarcaron el impacto que la eco-innovación tiene en los nuevos negocios y, como consecuencia, en la contribución a la construcción de una sociedad más sostenible, subrayando la importancia de la colaboración entre los diferentes grupos de interés, como la Universidad, entre otros [26]. Otras características que deben considerarse son la mayor cooperación y las relaciones más intensas que las empresas eco-innovadoras establecen con sus proveedores, lo que enlaza con la teoría de soporte de la cadena de suministro global para incrementar la competitividad compartiendo recursos y conocimiento [18]. Otros autores [27] han estudiado cómo la relación estrecha entre los institutos de investigación, y las empresas locales influyen positivamente en sus actividades de innovación.

Por otra parte, es evidente que el origen de la información influye en la forma de innovar en las empresas [29], pero poco se ha estudiado sobre la relación existente entre las fuentes de información a las que la empresa recurre para innovar y su orientación eco-innovadora. Los fabricantes de productos cerámicos consideran la sostenibilidad y las actuaciones respetuosas con el medioambiente como una variable cada vez más importante adaptando tanto sus actuaciones en proceso como a nivel estratégico y de toma de decisiones [13, 18, 26]. De esta forma establecemos la primera hipótesis centrada en el ámbito de estudio concreto que vamos a analizar en este trabajo.

2.1. Primera Hipótesis: el origen de la información en el proceso de innovación influye en la orientación eco-innovadora de las empresas del sector cerámico español.

Nidumolu et al. [29] apuntaron que las nuevas prácticas cambian los paradigmas existentes. De esta forma, para desarrollar innovaciones que se dirijan hacia estas nuevas prácticas, es necesario cuestionarse las asunciones implícitas existentes detrás de las prácticas actuales. Parece haber un consenso general en considerar la gestión medioambiental como una capacidad necesaria para crear estas plataformas para el cambio [30]. Entonces, podemos esperar que un comportamiento dinámico y abierto al cambio influya positivamente en la orientación medioambiental de la empresa. Por ejemplo, podemos esperar que empresas que centran sus esfuerzos en la reducción del consumo de materiales o de energía a través

de la innovación de procesos no sólo busquen la reducción de costes, sino también la reducción del impacto medioambiental [31]. Por otra parte, las firmas que quieren alcanzar nuevos mercados o que quieren desarrollar nuevos productos a través de la innovación de productos ven el nicho “verde” como una gran oportunidad y, en consecuencia, deben tener una orientación medioambiental mayor [32].

Así, más específicamente, establecemos que, en el ámbito de estudio que nos ocupa:

Segunda Hipótesis: la innovación en procesos y productos en las empresas del sector cerámico influye en su orientación eco-innovadora.

Son varios los autores que han estudiado los facilitadores de la eco-innovación (por ejemplo 23 y 33), concluyendo que el tamaño, la orientación exportadora o las actividades formales de I+D son vitales para su desarrollo a nivel de empresa. En consecuencia, la propia actividad de innovación (ver cuadro de texto), [34] debe ser un facilitador de la orientación medioambiental de la empresa cuando innova.

Hasta la fecha no se ha establecido qué efecto tiene cada uno de los tipos sobre la orientación eco-innovadora de la empresa y, en particular, sobre las empresas del sector cerámico español. De forma que establecemos nuestra...

Tercera hipótesis: la actividad innovadora previa de las empresas del sector cerámico influye en la orientación eco-innovadora de las empresas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MUESTRA Y VARIABLES SELECCIONADAS

Para la realización de este estudio hemos utilizado datos del *Panel de Innovación tecnológica* (PITEC). El panel de innovación tecnológica es un instrumento estadístico para el se-

guimiento de las actividades de innovación tecnológica de las empresas españolas. La base de datos está siendo construida por el *Instituto Nacional de Estadística* (INE), con el asesoramiento de un grupo de investigadores de la universidad, bajo el patrocinio de la *Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología* (FECYT) y *COTEC Fundación para la innovación tecnológica*. Iniciada en 2004, contribuye a mejorar la información estadística disponible sobre las actividades tecnológicas de las empresas y las condiciones para la realización de investigaciones científicas sobre las mismas.

Los ficheros accesibles se corresponden con los ficheros de la base de datos que mantiene el INE, excepto por la “anonimización” de una serie de variables de manera que las empresas a las que corresponden no puedan ser identificadas. Este proceso de anonimización introduce modificaciones sobre variables cuantitativas que no afectan a este estudio y reemplaza las actividades originales por una agrupación en 56 actividades hasta 2008 y en 44 actividades a partir de 2008 (para el año 2008 se proporcionan ambas agrupaciones). Puesto que la variable de identificación de cada empresa en la base de datos no varía en el tiempo, para identificar las empresas del sector para este estudio hemos utilizado la variable ACTI (actividad) para el año 2008. Esta variable representa el código según la Clasificación Nacional de Actividades Económicas (CNAE) 2003 y se prefiere sobre la variable ACTIN basada en la clasificación CNAE 2009 que incluye las empresas del sector en una categoría más genérica: “Productos minerales no metálicos”. Atendiendo a lo anterior hemos identificado las empresas dentro de “AZULEJOS Y BALDOSAS CERAMICAS” que disponían de información sobre las variables de estudio. Todas las empresas analizadas se encuentran en España aunque la base de datos no permite identificar directamente su localización geográfica.

Hemos seleccionado una serie de variables relacionadas con el comportamiento innovador de las empresas de acuerdo a la teoría estudiada previamente para establecer qué aspectos influyen en el comportamiento eco-innovador. Las variables objeto de este estudio se presentan en la Tabla 1.

INNOVACIÓN-DEFINICIONES BÁSICAS

El **Manual de Oslo** define la innovación como “la introducción de un nuevo o significativamente mejorado producto (bien o servicio), de un proceso, de un nuevo método de comercialización o de un nuevo método organizativo en las prácticas internas de la empresa, la organización del lugar de trabajo o las relaciones exteriores”.

Se distinguen cuatro tipos, las innovaciones de procesos, de productos, y de mercadotecnia, innovación en procesos:

- una innovación de producto se corresponde con la introducción de un bien o servicio nuevo o significativamente mejorado en cuanto a sus características o en cuanto al uso al que se destina.
- una innovación de proceso es la introducción de un nuevo o significativamente mejorado, proceso de producción o de distribución (cambios en las técnicas, en los materiales y/o los programas informáticos).
- una innovación en mercadotecnia es la aplicación de un nuevo método de comercialización que implique cambios significativos del diseño o el envasado de un producto, su posicionamiento, su promoción o su tarificación.
- una innovación de organización es la introducción de un nuevo método organizativo en las prácticas, la organización del lugar de trabajo o las relaciones exteriores de la empresa.

3.2. TÉCNICA DE ANÁLISIS

Hemos utilizado la técnica de *mínimos cuadrados parciales* (PLS) con el *software SmartPLS 2.0.M.3* (www.smartpls.de) para la estimación del modelo. El método PLS está considerado más adecuado cuando se tienen muestras relativamente pequeñas [35] que los *Modelos de Ecuaciones Estructurales Basados en Covarianza* (CBSEM) donde Boomsma and Hoogland [36] concluyeron que había problemas de convergencia y soluciones impropias para muestras pequeñas (200 casos o menos). PLS presenta otras ventajas que lo hacen recomen-

ble frente a CBSEM: Los modelos pueden ser muy complejos (con muchas variables latentes e ítems en relación con el número de observaciones) sin provocar problemas de estimación [37] y no requiere cumplir requisitos de distribución [38]. Además, PLS está más orientado a trabajos exploratorios que a confirmatorios, donde se busca el análisis causal-predictivo en situaciones complejas con poca información teórica [39].

En nuestro caso, el tamaño de la muestra es pequeño aunque suficiente [40] se dispone de un número relativamente alto de ítems y constructos frente al número de observaciones y las

Variables PITEC	Tipo de variable	Descripción
INCOMN1	D.	Innovación comercialización de (t-2) a t: Modificaciones significativas del diseño del producto o en el envasado de los bienes o servicios.
INCOMN2	D.	Innovación comercialización de (t-2) a t: Nuevas técnicas o canales para la promoción del producto.
INCOMN3	D.	Innovación comercialización de (t-2) a t: Nuevos métodos para el posicionamiento del producto en el mercado o canales de ventas.
INCOMN4	D.	Innovación comercialización de (t-2) a t: Nuevos métodos para el establecimiento de los precios de los bienes o servicios.
INORGN1	D.	Innovación organizativa de (t-2) a t: Nuevas prácticas empresariales en la organización del trabajo o de los procedimientos de la empresa.
INORGN2	D.	Innovación organizativa de (t-2) a t: Nuevos métodos de organización de los lugares de trabajo en su empresa con el objetivo de un mejor reparto de responsabilidades y toma de decisiones.
INORGN3	D.	Innovación organizativa de (t-2) a t: Nuevos métodos de gestión de las relaciones externas con otras empresas o instituciones públicas.
OBJET1	Cat.	Importancia objetivo inn. tec.: Gama más amplia de bienes o servicios.
OBJET2	Cat.	Importancia objetivo inn. tec.: Sustitución de productos o procesos anticuados.
OBJET3	Cat.	Importancia objetivo inn. tec.: Penetración en nuevos mercados.
OBJET4	Cat.	Importancia objetivo inn. tec.: Mayor cuota de mercado.
OBJET5	Cat.	Importancia objetivo inn. tec.: Mayor calidad de los bienes o servicios.
OBJET6	Cat.	Importancia objetivo inn. tec.: Mayor flexibilidad en la producción o la prestación de servicios.
OBJET7	Cat.	Importancia objetivo inn. tec.: Mayor capacidad de producción o prestación de servicios.
OBJET8	Cat.	Importancia objetivo inn. tec.: Menores costes laborales por unidad producida.
OBJET9	Cat.	Importancia objetivo inn. tec.: Menos materiales por unidad producida.
OBJET10	Cat.	Importancia objetivo inn. tec.: Menos energía por unidad producida.
OBJET11	Cat.	Importancia objetivo inn. tec.: Menor impacto medioambiental.
OBJET12	Cat.	Importancia objetivo inn. tec.: Mejora en la salud y la seguridad.
OBJET13	Cat.	Importancia objetivo inn. tec.: Cumplimiento de los requisitos normativos medioambientales, de salud o seguridad.
FUENTE 1	Cat.	Importancia fte. información: dentro de la empresa o grupo.
FUENTE 2	Cat.	Importancia fte. información: proveedores de equipo.
FUENTE 3	Cat.	Importancia fte. información: clientes.
FUENTE 4	Cat.	Importancia fte. información: competidores

Tabla 1: Variables seleccionadas de la base de datos PITEC (2010)

variables escogidas no siguen una distribución normal, lo que justifica el uso de PLS sobre CBSEM.

El uso de PLS requiere seguir dos etapas [41]: primero la evaluación del modelo de medida. Determinamos si la relación entre las variables observadas y los conceptos teóricos o constructos que se pretenden medir es correcta. Para ello, evaluamos la fiabilidad individual de cada ítem, la fiabilidad del constructo, la validez convergente y la validez discriminante de los indicadores como medidas de las variables latentes o constructos. Para la fiabilidad individual de cada ítem comprobamos que las cargas de cada ítem (las correlaciones absolutas entre un constructo y cada uno de sus ítems) son cercanas o superiores a 0,7 [42], aunque se permiten ítems con cargas superiores a 0,5 [42]. De esta forma cada variable latente explica al menos un 50% de la varianza de cada indicador. La fiabilidad de cada constructo o consistencia interna, evalúa el rigor con que los ítems están midiendo la variable latente. Para ello comprobamos que el índice de fiabilidad compuesta sea superior a 0,7 para las variables latentes según el criterio establecido por Nunnally y Bernstein [42]. La validez convergente indica que un conjunto de indicadores representa uno y el mismo constructo, lo que se demuestra comprobando que la varianza media extraída (AVE) de cada variable latente es al menos 0,5 [42], es decir, que la variable latente es capaz de explicar de media más de la mitad de la varianza de sus indicadores. La validez discriminante indica en qué medida un constructo del modelo es diferente a los otros constructos que conforman el modelo y se demuestra comprobando que las correlaciones entre los constructos son más bajas que la raíz cuadrada de la AVE [42].

En segundo lugar, evaluamos el modelo. El modelo intenta estimar una red de relaciones causales entre dos o más variables latentes complejas (constructos), cada una de ellas medida a través de un número observable de variables (ítems o indicadores). El objetivo de esta etapa es confirmar en qué medida las relaciones causales especificadas por el modelo propuesto se corresponden con los datos disponibles. De este modo, observamos el porcentaje de la varianza de las variables endógenas que es explicada por los constructos que las predicen. Para medir el poder predictivo de un modelo utilizamos el valor de

la R^2 para las variables latentes dependientes. Además, para cada camino, los valores de los coeficientes (*path*) del modelo indican la fortaleza de las relaciones causales propuestas y permiten comparar el efecto relativo de cada relación. La estabilidad y validez de estas relaciones se examina utilizando el estadístico t obtenido mediante el *bootstrapping*¹ con 5000 submuestras. Finalmente, para comprobar la validez del modelo se realizó el Test de *Stone-Geisser* (Q^2). El valor de Q^2 se obtiene mediante un proceso de *blindfolding*² y se usa como criterio para medir la relevancia predictiva de los constructos dependientes. En el caso de que la $Q^2 > 0$ indica que el modelo tiene relevancia predictiva, en caso contrario no la tiene [42].

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos indican que las cargas de cada ítem son superiores a los valores límite generalmente aceptados (ver Fig. 1) y que todos los valores de fiabilidad compuesta de los constructos superan 0,7 (Tabla 2). Por otra parte los valores de varianza media explicada (AVE) son superiores a 0,5 (Tabla 2) y las correlaciones entre los constructos son más bajas que la raíz cuadrada de las varianzas medias explicadas (Tabla 3). En consecuencia los resultados obtenidos para el modelo de medida avalan la elección de indicadores realizada, constituye una medida de validez de los ítems que representan cada uno de los constructos [43, 44], y podemos afirmar que el modelo de medida utilizado resulta válido y fiable.

En la Figura 1 los rectángulos representan a las variables observables (ítems) de la base de datos PITEC y los círculos a las variables latentes no observables (constructos). Las flechas representan las relaciones de regresión entre las variables latentes y los ítems (modelo de medida) y entre las distintas variables latentes (modelo estructural).

Como podemos apreciar en la Tabla 2 y en la Figura 1, los coeficientes R^2 (valores en el interior de variable latente en la Fig. 1) asociados a las regresiones de las variables latentes son significativos (superiores a 0,2 [41]) y modelo tiene un alto poder explicativo (75%) de la Eco-orientación.

Por otra parte, los coeficientes (valores sobre las flechas

	AVE	Fiabilidad compuesta	R^2	α de Cronbach	Comunalidad	Redundancia
Inf. Mercado	0,750	0,900		0,835	0,750	
Innov. Com.	0,517	0,757		0,563	0,517	
Innov. Org.	0,642	0,842		0,713	0,642	
Or. Procesos	0,697	0,920	0,510	0,891	0,697	0,285
Or. Productos	0,798	0,952	0,244	0,936	0,798	0,165
Eco-orientación	0,838	0,939	0,750	0,903	0,838	0,614

Tabla 2: Medidas de fiabilidad

¹ Bootstrap: construye muestras con remplazamiento de los datos originales con el mismo número de casos que la muestra original.

² Blindfolding: consiste en omitir parte de la matriz de datos para el constructo sometido a análisis y estimar los parámetros del modelo.

en Fig.1) nos indican el nivel de relación existente entre los constructos. Por ejemplo, el coeficiente que relaciona la orientación a procesos y la eco-orientación tiene un valor de 0,780, es decir, si la orientación varía en una unidad, el aumento de la eco-orientación variará en el mismo sentido en 0,780 unidades.

En este caso, debemos tener en cuenta la especial formulación de las variables en la base de datos. Esto es, las variables categóricas utilizadas para determinar los constructos miden su importancia desde 1=muy importante hasta 4=no importante o no relevante, mientras que las variables dicotómicas utilizadas en el estudio están codificadas en sentido contrario 0=No y 1=Si. Por tanto, un incremento en el valor de la variable dicotoma se contrapone (tiene signo opuesto) a un incremento en una variable categórica. En consecuencia, un signo negativo en los coeficientes estandarizados en el caso en el que intervengan los constructos innovaciones comerciales y organizacionales está apoyando la hipótesis propuesta.

Para confirmar las hipótesis realizadas, en la Tabla 4 se

muestran los resultados de los coeficientes de regresión entre los factores latentes, su estadístico t y los p-valores, estimados mediante "bootstrapping" [43].

El modelo confirma que la variable importancia de las fuentes de información de mercado en el proceso innovación

	Q ²
Información de mercado	0,492
Innovación de comercialización	0,022
Innovación organizativa.	0,298
Organización de procesos	0,329
Organización de productos	0,169
Eco-orientación	0,599

Tabla 5: Valor de las Q² para los distintos constructos

	Información de mercado	Innovación de comercialización	Innovación organizativa	Orientación a procesos	Orientación a productos	Eco-orientación
Información de mercado	0,866					
Innovación de comercialización	-0,281	0,719				
Innovación organizativa	-0,358	0,574	0,801			
Orientación a procesos	0,644	-0,347	-0,519	0,835		
Orientación a productos	0,464	-0,293	-0,348	0,682	0,893	
Eco-orientación	0,461	-0,282	-0,544	0,821	0,651	0,915

Raíz cuadrada de AVE en negrita

Tabla 3: Matriz de correlaciones entre las variables latentes

	Efectos totales	Error estándar	Test t
Información de mercado -> Orientación hacia procesos	0,526	0,065	8,149***
Información de mercado -> Orientación hacia productos	0,415	0,119	3,472***
Información de mercado -> Eco-orientación	0,460	0,057	8,079***
Innov. de comercialización -> Orientación hacia productos	-0,176	0,073	2,427**
Innov. de comercialización -> Eco-orientación	-0,021	0,021	0,998
Innov. de Organización -> Orientación hacia procesos	-0,331	0,064	5,178***
Innov. de Organización -> Eco-orientación	-0,258	0,060	4,284***
Orientación hacia procesos -> Eco-orientación	0,780	0,072	10,715***
Orientación hacia productos -> Eco-orientación	0,119	0,078	1,529

*** Significativo con p-valor<0,001, ** Significativo con p-valor<0,01

Tabla 4: Test de hipótesis para efectos directos entre variables latentes

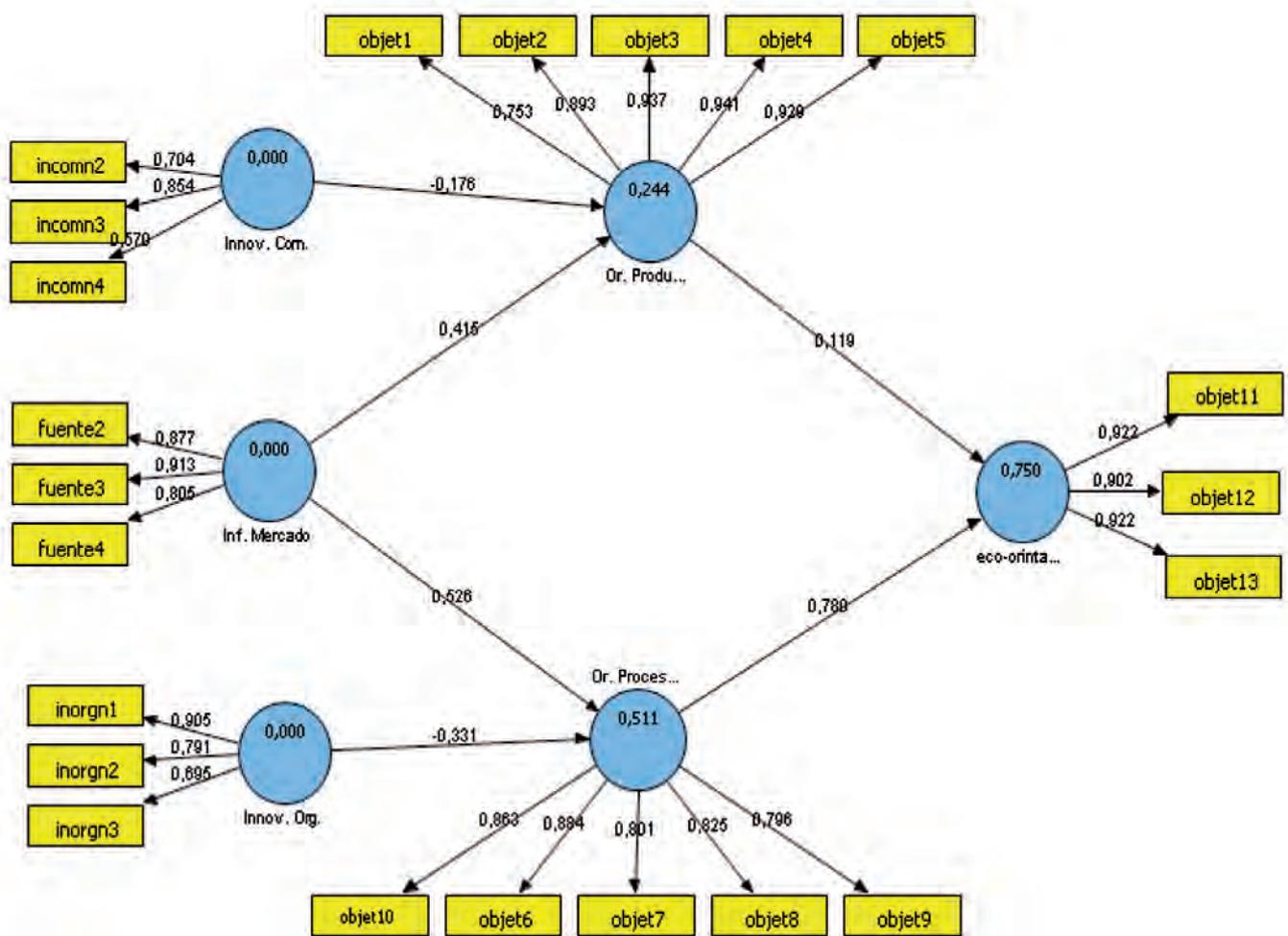


Fig. 1: Estimación del "modelo de ecuaciones estructurales"

influye positivamente tanto en la orientación hacia productos ($\beta = 0,416$, $p < 0,001$) como en la orientación hacia procesos ($\beta = 0,526$, $p < 0,001$) cuando se innova, confirmando así las hipótesis 1 y 2. Asimismo, el modelo confirma que las empresas del sector cerámico que han introducido innovaciones organizacionales tienen mayor orientación hacia los procesos cuando innovan ($\beta = -0,331$, $p < 0,001$) y que las que han introducido innovaciones comerciales también tienen una orientación significativamente superior hacia los productos cuando innovan ($\beta = -0,176$, $p < 0,001$).

En relación al impacto de las distintas variables en la orientación medioambiental de las empresas del sector cerámico podemos decir que, la orientación hacia procesos cuando se innova influye positivamente en la eco-orientación ($\beta = 0,780$, $p < 0,001$), mientras que, al contrario de lo esperado, la orientación hacia productos no influye de manera significativa. Como resultado, podemos afirmar que, tanto la dependencia de las fuentes de información del mercado en el proceso de innovación como la introducción de innovaciones organizacionales influyen positivamente en la orientación eco-innovadora de las empresas del sector cerámico ($p < 0,001$).

Para finalizar, en la Tabla 5 comprobamos que todos los valores del Test de Stone-Geisser (Q^2) son positivos, lo que certifica la relevancia predictiva del modelo.

5. DISCUSIÓN

El propósito de este estudio ha sido el de identificar los determinantes del comportamiento eco-innovador de las empresas del sector cerámico. Los resultados indican que la orientación innovadora hacia procesos, la dependencia de las fuentes de información provenientes de los competidores, de los clientes, de los proveedores y de agentes externos (definidas como de mercado) en el proceso de innovación y la actividad innovadora anterior (innovaciones comerciales y organizacionales), son factores clave en la orientación medioambiental de las empresas del sector cerámico cuando innovan. Usando el paquete informático, *SmartPLS 2.0*, el modelo de medida se confirmó con suficiente fiabilidad y validez para todos los constructos del modelo. Además, el modelo estructural demuestra que todos los coeficientes estructurales son estadísticamente significativos, con la excepción de la influencia de la orientación hacia productos, que sólo se demostró la direccionalidad de la relación.

Los resultados de nuestro estudio son consistentes con estudios previos donde se demuestra que la actividad innovadora de las empresas influye positivamente en la orientación medioambiental. Las evidencias parecen soportar el hecho de que los esfuerzos en mejorar la flexibilidad productiva, aumentar la capacidad productiva, el ahorro de costes, la reduc-

ción del consumo de materiales y de energía (orientación a procesos), influyen positivamente en la orientación eco-innovadora de las empresas. Por otra parte, demostramos que la dependencia de la información proveniente de proveedores, competidores y clientes (fuentes de información del mercado) incrementa la sensibilidad hacia la orientación a productos y procesos mientras innovan y, consecuentemente, incrementa la orientación medioambiental.

Los resultados de esta investigación, siguiendo la línea marcada en estudios previos [12,13] tienen importantes aplicaciones prácticas por lo que a las actuaciones de política industrial que promueven la eco-innovación se refiere, ya que determina las características de las empresas susceptibles de aprovechar las actuaciones públicas. La UE, a través de diferentes programas, está financiando proyectos de eco-innovación, principalmente orientados a PYMES. La optimización de estos programas financiados con fondos públicos requiere de una caracterización previa de las empresas que desarrollan procesos de eco-innovación así como identificar los factores que influyen positivamente en una empresa para que pase de ser innovadora a ser eco-innovadora y considere el medioambiente como variable importante dentro del proceso de innovación. En este trabajo se ha señalado que sería más eficaz fomentar la innovación hacia procesos en las empresas ya que esta actividad influye, por ejemplo, en la reducción del consumo de materiales y de energía, lo que en definitiva transmite una preocupación hacia el medioambiente en el proceso de innovación.

Este trabajo ha contribuido al cuerpo de conocimiento de la eco-innovación al explicar cómo la actividad innovadora previa, la orientación interna y las fuentes de información que dirigen los procesos de innovación en las empresas del sector cerámico, influyen en la orientación eco-innovadora de las mismas. Por otra parte, las decisiones que a nivel interno tomen las empresas pueden estar mejor orientadas, los resultados permitirían mejorar la eficiencia de las inversiones en innovación si lo que se busca es ser más sostenible. Así, dirigir la inversión en I+D hacia la mejora de los procesos en lugar de hacerlo hacia la innovación organizativa, de comercialización o de producto tendrá un efecto positivo en la sostenibilidad empresarial.

Las limitaciones de este estudio se deben, básicamente, a las restricciones de la base de datos. Como actuaciones futuras nos planteamos analizar con mayor profundidad las relaciones existentes en industrias auxiliares del sector para confirmar el patrón de comportamiento encontrado. Por otra parte, sería interesante extender el estudio a otros países en los que el sector cerámico tenga impacto económico similar (por ejemplo, Italia) y poder comparar los resultados obtenidos, así como la replicación del estudio a otros sectores industriales con el fin de contrastar el modelo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Economía y Competitividad por el apoyo económico recibido a través del proyecto (EC02011-27369), así como a la Universitat Politècnica de València por la financiación a través de su programa de

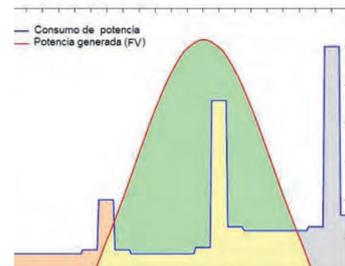
movilidad de profesores y del proyecto PAID-06-2011-1879, "Impacto de las prácticas innovadoras en el "performance" medioambiental de la empresa: identificación de factores moderadores".

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Porter ME, Van der Linde C. "Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship". *The Journal of economic perspectives*, 1995.Vol.9. p.97-118. DOI: <http://dx.doi.org/10.1257/jep.9.4.97>
- [2] Bengoetxea-Usategi C. "Desarrollo sostenible: una visión integrada " *DYNA Ingeniería e Industria*. Octubre 2007. Vol. 82-7 p.342-346
- [3] Mondéjar-Jiménez J, Vargas-Vargas M, Mondéjar-Jiménez J. "Measuring environmental evolution using synthetic indicators". *Environmental Engineering and Management Journal*, 2010.Vol.9. p.1145-1149.
- [4] Segarra-Oña M, Peiró-Signes A, Mondéjar-Jiménez J. "Identifying variables affecting the proactive environmental orientation of firms: An empirical study", *Polish Journal of Environmental Studies*, 2013. Vol.22.p. 873-880.
- [5] Næss P. "Urban planning and sustainable development". *European Planning Studies*, 2001.Vol.9. p.503-524. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/713666490>
- [6] Aguayo-González F, Lama-Ruiz J, Peralta-Álvarez M. "ingeniería sostenible de la cuna a la cuna: una arquitectura de referencia abierta para el diseño c2c" *DYNA*. Abril 2011. Vol. 86-2 p.199-211. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/3873>
- [7] Sullivan, R. "Being sustainable...be specific", *Engineering Management Journal*, 2002. Vol.12. p. 220-225. DOI no disponible
- [8] Pohoryles RJ. "Europe in the making – what role environmentalism; and, why should sustainable development be less than environmentalism? " *Innovation: The European Journal of Social Science Research*, 2010. Vol. 23. p.319-322. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/13511610.2011.566101>
- [9] Pirani E, Secondi L. "Eco-friendly attitudes: What european citizens say and what they do". *International Journal of Environmental Research*, 2011.Vol.5. p.67-84.
- [10] Carrillo-Hermosilla J, del Río P, Könnölä T. "Diversity of eco-innovations: Reflections from selected case studies". *Journal of Cleaner Production*, 2010.Vol.18. p.1073-1083. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.02.014>
- [11] Chen C, Huang J. "Strategic human resource practices and innovation performance—The mediating role of knowledge management capacity". *Journal of Business Research*, 2009.Vol.62. p.104-114. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jbusres.2007.11.016>
- [12] Peiró-Signes A, Segarra-Oña M, Miret-Pastor L, et al. "Eco-innovation attitude and industry's technological level. an important key for promoting efficient vertical policies". *Environmental Engineering Management Journal*, 2011.Vol.10. p.1893-1902.
- [13] Segarra-Oña M, Peiro-Signes A, Miret-Pastor L, et al. "¿Eco-innovación, una evolución de la innovación?. Análisis empírico en la industria cerámica española". *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 2011.Vol.50. p.253-260. DOI: <http://dx.doi.org/10.3989/cyv.292011>.
- [14] ASCER, "Datos. El sector". En <http://www.ceramicadeespaña>. Consultado el 6/8/2013
- [15] Espí Rodríguez JA., "Determinación de la sostenibilidad de

- la industria mineral de la cerámica y del vidrio mediante herramientas de gestión ambiental", *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*.2011.Vol.50.p.151-160. DOI: <http://dx.doi.org/10.3989/cyv.202011>
- [16] Criado, E. "Reflexiones sobre el futuro de la Industria Europea de la Cerámica", *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 2007.Vol. 46. p.9-44. DOI: <http://dx.doi.org/0366-3175>
- [17] Hervás JL, Albors J, Dalmau JI. "External ties and the reduction of knowledge asymmetries among clusters within global value chains: The case of the ceramic tile district of castellon". *European Planning Studies*, 2006.Vol.16. p.507-520. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/09654310801983308>
- [18] Peiró-Signes A, Segarra-Oña M, Mondéjar-Jiménez J, et al. «ISO 14001 y variables económicas, ¿hay alguna relación? análisis de las empresas certificadas del sector cerámico español». *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 2013.Vol.52. p.15-24. DOI: <http://dx.doi.org/10.3989/cyv.22013>
- [19] Beise M, Rennings K. "Lead markets and regulation: A framework for analyzing the international diffusion of environmental innovations". *Ecological Economics*, 2005.Vol.52. p.5-17. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.06.007>
- [20] Segarra-Oña M, Peiró-Signes Á, Verma R, et al. "Does environmental certification help the economic performance of hotels? Evidence from the Spanish hotel industry". *Cornell Hospitality Quarterly*, 2012.Vol.53. p.242-256. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/1938965512446417>
- [21] Fernandez-Alcala J. "ECODISEÑO: Integración de criterios ambientales en la sistemática del diseño de productos industriales" *DYNA Ingeniería e Industria*. Octubre 2007. Vol. 82-7 p.351-360.
- [22] OCDE, Sustainable manufacturing and eco-innovation: First steps in building a common analytical framework. DSTI/IND (2008) 16/REV1, OECD, Paris: 2008.
- [23] De Marchi V. "Environmental innovation and R&D cooperation: Empirical evidence from spanish manufacturing firms". *Research Policy*, 2012.Vol.41. p.614-623. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.respol.2011.10.002>
- [24] Hellström T. "Dimensions of environmentally sustainable innovation: The structure of eco-innovation concepts". *Sustainable Development*, 2007.Vol.15. p.148-159. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/sd.309>.
- [25] Rennings K. "Redefining innovation—eco-innovation research and the contribution from ecological economics". *Ecological Economics*, 2000.Vol.32. p.319-332. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00112-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00112-3).
- [26] De Prado-Trigo A, Campo-Ramila F, Muniozgueren-Colindres J. "Aulas de ecodiseño: análisis de ciclo de vida y ecodiseño en la industria" *DYNA Ingeniería e Industria*. Febrero 2011. Vol. 86-1 p.74-79. DOI: 10.6036/3848
- [27] Díez JR. "The importance of public research institutes in innovative networks—empirical results from the metropolitan innovation systems barcelona, stockholm and vienna". *European Planning Studies*, 2000.Vol.8. p.451-463. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/713666418>
- [28] Amara N, Landry R. "Sources of information as determinants of novelty of innovation in manufacturing firms: Evidence from the 1999 statistics canada innovation survey". *Technovation*, 2005.Vol.25. p.245-259. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0166-4972\(03\)00113-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0166-4972(03)00113-5)
- [29] Nidumolu R, Prahalad CK, Rangaswami M. "Why sustainability is now the key driver of innovation". *Harvard Business Review*, 2009.Vol.87. p.56-64. DOI no disponible
- [30] Sartorius C. "Second-order sustainability—conditions for the development of sustainable innovations in a dynamic environment". *Ecological Economics*, 2006.Vol.58. p.268-286. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.07.010>
- [31] Etkowitz H, Zhou C. "Triple helix twins: Innovation and sustainability". *Science and public policy*, 2006.Vol.33. p.77-83. DOI: <http://dx.doi.org/10.3152/147154306781779154>
- [32] Danneels E. "The dynamics of product innovation and firm competences". *Strategic Management Journal*, 2002.Vol.23. p.1095-1121. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/smj.275>
- [33] Biondi V, Iraldo F, Meredith S. "Achieving sustainability through environmental innovation: The role of SMEs". *International Journal of Technology Management*, 2002.Vol.24. p.612-626. DOI: <http://dx.doi.org/10.1504/IJTM.2002.003074>
- [34] Oslo Manual, Organisation for Economic Co-operation and Development, The measurement of scientific and technological activities proposed guidelines for collecting and interpreting technological innovation data, European Commission Eurostat, 2005.
- [35] Tenenhaus M, Vinzi VE, Chatelin Y, et al. "PLS path modeling". *Computational Statistics & Data Analysis*, 2005.Vol.48. p.159-205. DOI no disponible.
- [36] Boomsma A, Hoogland JJ. The robustness of LISREL modeling revisited. En Cudeck R., Du Toit S. y Sörbom D. (editores). Chicago: Scientific Software International, 2001. p. 139-168. ISBN: 0-89498-049-01
- [37] Wold HO. (1985). Partial least squares. En: Kotz S. y Johnson N.L. (editores). New York: Wiley, 1985. p. 581-591. ISBN:3-54032-827-0
- [38] Fornell C., Larcker DF. "Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error". *Journal of Marketing Research*, 1981.p.39-50. DOI no disponible
- [39] Jöreskog KG. The LISREL approach to causal model-building in the social sciences. En Jöreskog KG. y Wold HO. Amsterdam. Wold (Eds). 1982. p. 81-100. ISBN:0-20230-314-4
- [40] Henseler J, Ringle CM, Sinkovics RR. "The use of partial least square path modelling in international marketing". *Advance in International Marketing*, 2009, Vol. 20. p. 277-319. DOI no disponible.
- [41] Nunnally JC., Bernstein IJ. *Teoría psicométrica*. 2ª edición, 1995. Mexico. McGraw-Hill. 843 p. ISBN: 9789701006344
- [42] Churchill GA. "A paradigm for developing better measures of marketing constructs". *Journal of Marketing Research*, 1979. Vol. 16. p. 64-73.
- [43] Peña D.. *Análisis de datos multivariantes*. Madrid: McGraw-Hill. 2002. 539p. ISBN: 8448136101.
- [44] Hair JF, Anderson RE, Tatham RL, et al. *Multivariate data analysis*, 5ª edición. Nueva York,: Prentice Hall International, 1998. 816p. ISBN-10: 0138132631

Viabilidad económica de instalaciones fotovoltaicas de pequeña potencia para viviendas mediante la modalidad de balance neto



ECONOMIC VIABILITY OF SMALL POWER PHOTOVOLTAIC FACILITIES FOR DWELLINGS BY USING THE NET-METERING MODE

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5754> | Recibido: 13/02/2013 • Aceptado: 11/10/2013



Pablo García-Triviño, Francisco Llorens-Iborra
Eloy García-Pichardo, Carlos Andrés García-Vázquez
Luis Miguel Fernández-Ramírez

UNIVERSIDAD DE CÁDIZ. Escuela Politécnica Superior de Algeciras.
Dpto. de Ingeniería Eléctrica. Avda. Ramón Puyol, s/n - 11202
Algeciras (Cádiz). Tfno: +34 956 028025. pablo.garcia@uca.es

ABSTRACT

- The entry into force of Royal Decree-Law 1/2012 has led to the elimination of the support schemes to promote the use of the energy from renewable energy sources existing to date in Spain, and thus, certain standstill of this sector activity. In this context, some renewable technologies, mainly photovoltaic solar, can find in self-consumption an alternative for promoting their development and use. The self-consumption in the form of net-metering is mainly characterized by the possibility that the consumer can generate *in situ* part of the consumed electricity and use the network as storage or supply system. This option is still under study by the Government, so that there are two drafts of Royal Decree, none of which has been approved to date. The aim of this paper is to analyze the economic viability of the net-metering mode in dwellings with small power photovoltaic facilities, considering those options that can contribute to make them viable.
- **Keywords:** photovoltaic solar, self-consumption, renewable energies.

RESUMEN

La entrada en vigor del Real Decreto-Ley 1/2012 ha supuesto la eliminación de los regímenes de ayudas para el fomento de las energías renovables existentes hasta la fecha en España, y en consecuencia, cierta paralización de la actividad de este sector.

En este contexto, algunas tecnologías renovables, principalmente la solar fotovoltaica, pueden encontrar en el autoconsumo una alternativa para fomentar su desarrollo y uso. El autoconsumo en la modalidad de balance neto se caracteriza, principalmente, por la posibilidad de que el consumidor pueda generar *in situ* parte de la energía eléctrica que consume y utilizar la red como forma de almacenamiento o suministro complementario. Esta opción está aún bajo estudio por parte del Gobierno, existiendo dos borradores de Real Decreto, ninguno de los cuales ha sido aprobado hasta la fecha. El objetivo del presente trabajo es analizar la viabilidad económica del modelo de balance neto de energía en viviendas con instalaciones fotovoltaicas de pequeña potencia, planteándose aquellas opciones que puedan contribuir a hacerlas viables.

Palabras clave: solar fotovoltaica, autoconsumo, energías renovables.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, problemas como la escasez de las reservas de petróleo, la alta dependencia de los combustibles fósiles y las emisiones de CO₂ que el uso de éstos provoca, hacen que sea necesaria la búsqueda de alternativas energéticas en el actual sector eléctrico. Por otra parte, la subida de los precios de la energía eléctrica y la disminución de los costes de la tecnología fotovoltaica, hacen que la energía solar fotovoltaica pueda encontrar en el modelo de balance neto una alternativa que permita fomentar su desarrollo y uso. Básicamente, este modelo se caracteriza por la posibilidad del consumidor de generar *in situ* parte de la energía eléctrica que consume. La energía excedentaria producida será vertida a la red y posteriormente podrá ser recuperada, utilizando la propia red como un sistema de acumulación.

Grandes potencias internacionales como Alemania, Reino Unido, Italia y Estados Unidos apuestan ya por el sistema del autoconsumo (Botero B et al., 2008).

En España, hasta diciembre de 2011, se fomentaba la energía solar fotovoltaica mediante incentivos/primas sobre el precio de generación de la energía eléctrica. La entrada en vigor del Real Decreto-Ley 1/2012 de 27 de enero, por el que se suprimen los incentivos económicos, ha provocado que en estos momentos el

sector fotovoltaico esté paralizado (Jefatura del Estado, 2012). Actualmente existen dos borradores de Real Decreto (RD) que tratan la regulación de la modalidad de suministro de energía eléctrica con balance neto. El primero de ellos, de fecha 18 de noviembre de 2011 (Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2011), permitiría un relanzamiento del sector de la energía solar fotovoltaica.

El segundo borrador, hecho público el 18 julio de 2013 (Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2013), difiere significativamente del inicialmente presentado y supondría un grave perjuicio para la conexión a la red pública de instalaciones solares fotovoltaicas, al hacerlas prácticamente inviables económicamente.

En este artículo, se analiza la viabilidad económica del modelo de balance neto de energía en viviendas con instalaciones fotovoltaicas de pequeña potencia basadas en el borrador de RD de 18 de noviembre de 2011, planteándose aquellas opciones que puedan contribuir a hacer viables este tipo de instalaciones.

2. EL AUTOCONSUMO EN ESPAÑA

En España, las primeras referencias al autoconsumo aparecen en el RD 1699/2011, de 18 de noviembre, (Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2011b). En el capítulo IV se establece que: “El Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, en el plazo de cuatro meses desde la entrada en vigor del Real decreto 1699/2011, elevará al Gobierno una propuesta”.

El mismo 18 de noviembre de 2011 se aprobó el “proyecto de Real Decreto por el que se establece la regulación de las condiciones administrativas, técnicas y económicas de la modalidad de suministro de energía eléctrica con balance neto” (Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2011). Se define la modalidad de suministro de balance neto como aquel sistema que permite a los consumidores la producción individual de energía para su propio consumo y puede utilizar la red como sistema de almacenamiento. Este sistema es interesante para las instalaciones de generación eléctrica con fuentes renovables no gestionables, como la energía eólica o energía solar, cuyo coste de producción es superior al precio de venta de la energía en el mercado eléctrico.

El sistema de balance neto consiste en producir la energía eléctrica en el mismo lugar de su consumo, en la propia vivienda. Si la demanda de energía es inferior a la producción de energía eléctrica, se exportará energía a la red (energía excedentaria), mientras que si la demanda de energía es superior, se importará energía de la red. La energía excedentaria vertida a la red no llevará aparejada ninguna contraprestación económica, pero sí generará unos derechos de consumo diferidos. A estos derechos de consumo diferidos se le denominará peaje y corre a cuenta del consumidor. En el capítulo IV, artículo 9 del proyecto de RD se establece que la energía excedentaria vertida a la red podrá ser utilizada durante un plazo máximo de 12 meses después de la generación del derecho. Por el aprovechamiento de los derechos de consumo diferido el consumidor pagará el coste del servicio de gestión de excedentes y los peajes que sean de aplicación, los cuales aún no han sido definidos.

El ámbito de aplicación de este proyecto de RD es para consumidores de energía eléctrica de potencia contratada no superior a 100 kW por punto de suministro, que instalen en su red interior

una instalación de generación de energía eléctrica destinada a su propio consumo. El consumidor dispondrá de los equipos de medida necesarios para la facturación. Para poder ser admitido en la modalidad de balance neto, el titular de un nuevo punto de suministro deberá realizar un contrato de suministro con la empresa comercializadora.

Existe una serie de parámetros y terminología en este proyecto de RD que aún no están detallados con claridad. A continuación nos disponemos a realizar una interpretación concreta de dichos términos:

- *Período de facturación*: tiempo equivalente a un año compuesto por 12 meses, con inicio en la fecha de firma del contrato entre el consumidor y la comercializadora.
- *Período de validez para la recuperación de la energía vertida*: se dispone de 12 meses para poder recuperar la energía vertida a la red desde la fecha de generación, siempre que nos encontremos dentro del mismo periodo de facturación.
- *Derechos de consumo diferido*: también denominado peaje de acceso, es la contraprestación económica por cada kWh consumido de la red y que anteriormente se ha vertido a la propia red de forma gratuita.
- *Energía generada y vertida a la red, o energía acumulada*: se trata del excedente de energía que se ha vertido a la red en los momentos en los que el consumo es inferior a la producción de energía.
- *Consumo de la red*: cuando no se disponga de energía acumulada, el precio de la energía consumida será el precio de la Tarifa de Último Recurso (TUR) sin discriminación horaria correspondiente (Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2012).

En el marco del balance neto, se tiene de forma simultánea demanda y generación de energía en la propia instalación propiedad del consumidor. En estas circunstancias se distinguen cuatro situaciones posibles de gestión de la energía.

En la Figura 1 se representan el consumo típico de potencia de una vivienda unifamiliar y la curva de la potencia eléctrica generada por los paneles solares FV instalados en la vivienda para un día concreto, de forma que la energía generada en el día es igual a la energía consumida. Se pueden

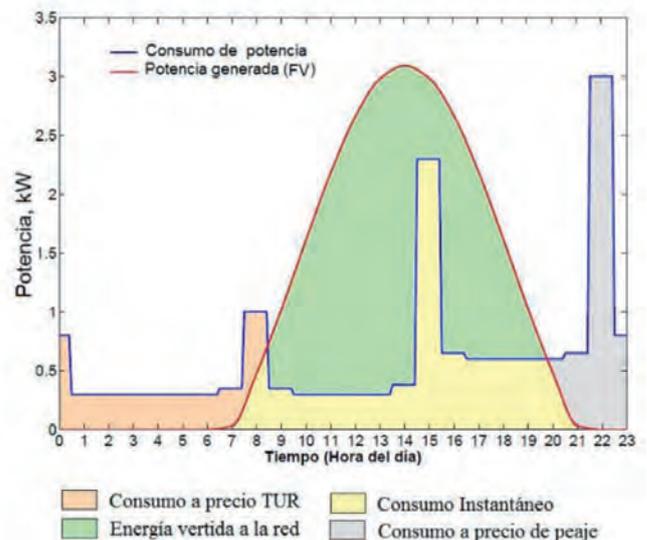


Fig. 1: Curva de consumo y generación fotovoltaica

distinguir cuatro formas de funcionamiento en dicha figura. La primera, denominada “consumo a precio TUR” (color naranja), hace referencia a periodos en los que la energía se consume directamente de la red al precio que tenga establecido la compañía suministradora, cuando aún no existe energía previamente almacenada por el propio usuario. El “consumo instantáneo” (color amarillo) se produce cuando la producción eléctrica en ese instante es superior o igual a la demanda que requiere la instalación, y no supone ningún coste adicional al propietario. El área comprendida entre la curva “Potencia generada (FV)” y la curva “Consumo de potencia” es la “energía excedentaria vertida a la red” (color verde), que ni la Administración ni la compañía eléctrica recompensan. Por último, se denomina “consumo a precio de peaje” a los periodos en los que la energía se consume de la red cuando la producción de energía es inferior a la demanda, siempre y cuando se haya vertido dicha energía a la red anteriormente, lo cual supone un coste por el almacenamiento y gestión de excedentes. En este ejemplo, dado que la producción es igual a la generación, al final del día se tiene almacenada en la red una cantidad igual a la energía consumida a precio TUR en la primera zona, que podrá ser recuperada posteriormente si nos encontramos dentro del mismo período de facturación.

El segundo borrador “Proyecto de Real Decreto por el que se establece la regulación de las condiciones administrativas, técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y de producción con autoconsumo”, hecho público el 18 julio de 2013 (Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2013), difiere significativamente del comentado con anterioridad, y supondría una grave perjuicio para la conexión a la red pública de instalaciones solares fotovoltaicas, al hacerlas prácticamente inviables económicamente. Entre las novedades que aporta podemos destacar:

- No existe un mecanismo de compensación diferida en el tiempo, por lo que toda la energía excedentaria producida por los paneles fotovoltaicos y vertida a la red no puede ser recuperada por el propietario de la instalación.
- Introduce el llamado “peaje de respaldo”, para la sostenibilidad del sistema en el corto plazo. Este peaje será de aplicación a toda la energía consumida procedente de la propia instalación fotovoltaica. La energía producida no solo no se prima, sino que se penaliza.
- Se proponen peajes de respaldo muy elevados que hacen económicamente inviables las modalidades de suministro y producción con autoconsumo.

En septiembre de 2013, la Comisión Nacional de la Energía emitió un informe sobre la última propuesta de RD (Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2013) en la que pueden destacarse las siguientes afirmaciones:

- El establecimiento de un “peaje de respaldo” únicamente a los consumidores acogidos a las modalidades de autoconsumo, supone un trato discriminatorio con respecto al resto de consumidores.
- No se deducen del “peaje de respaldo” los beneficios sociales que están asociados a la producción distribuida y al autoconsumo, como son el ahorro por las pérdidas de energía en la red, la reducción de las inversiones netas en el sistema, la menor dependencia energética, y el menor

impacto medioambiental de las actividades eléctricas. En la normativa europea se promociona a la generación distribuida y el autoconsumo cuanto menos por todas estas razones.

- A juicio de esta Comisión, la propuesta sacrifica la eficiencia económica a medio y largo plazo en aras de la sostenibilidad económica a corto plazo, entendida como recuperación de costes en gran parte hundidos que preceden en el tiempo al autoconsumo y no son achacables a él.
- La Comisión, así como una gran mayoría de los miembros del Consejo Consultivo, considera que se debería eliminar el “peaje de respaldo” contenido en la propuesta.

3. ÁMBITO DE APLICACIÓN DEL ESTUDIO

El presente estudio de viabilidad se realiza para una vivienda unifamiliar con grado de electrificación básico (Ministerio de Ciencia y Tecnología, 2002). El suministro eléctrico

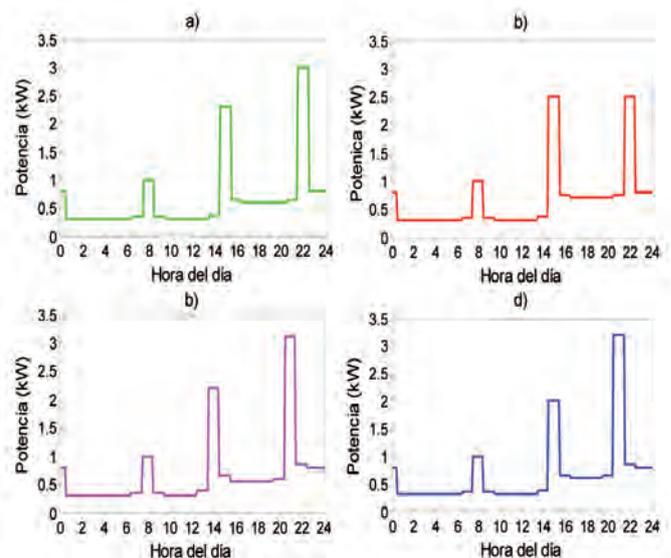


Fig. 2: Curvas de consumo en un día típico de cada estación: a) Primavera, b) Verano, c) Otoño, d) Invierno

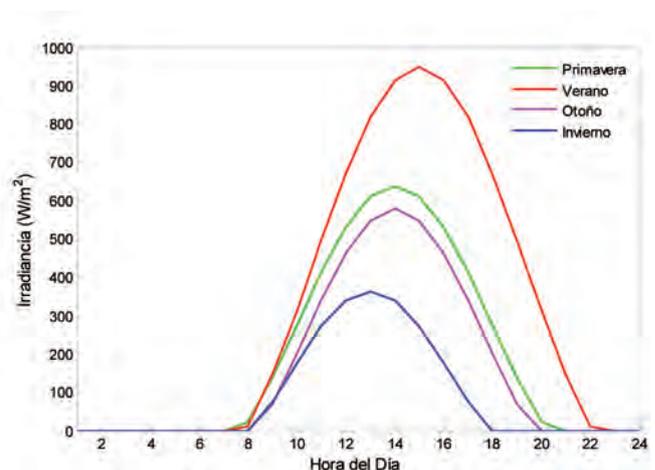


Fig. 3: Irradiancia solar para las diferentes estaciones del año

de la vivienda es monofásico a 230 V, con una potencia contratada de 4,6 kW.

A efectos del cálculo de la generación solar fotovoltaica, la vivienda está situada en Vejer de la Frontera, término municipal de la provincia de Cádiz.

3.1. CURVAS DE DEMANDA DE POTENCIA

La cantidad de energía eléctrica consumida en la vivienda varía a lo largo del día, y de forma distinta en las diferentes estaciones del año. En invierno, la demanda máxima típica de energía eléctrica se produce entre las 21:00 y las 22:00 horas. En verano, además de la punta de consumo de la tarde/noche, se produce otro máximo de demanda de energía en las horas centrales del día, entre las 14:00 y las 16:00 horas (Red Eléctrica de España, 2012).

Para determinar el consumo eléctrico de la vivienda objeto de estudio se ha hecho una estimación, asemejando la gráfica del consumo de la vivienda al consumo típico del sector residencial en España en cada una de las estaciones del año, cuyo resultado se muestra en la Figura 2. Las curvas propuestas presentan un consumo de 16 kWh al día y 490 kWh mensuales.

3.2. RADIACIÓN SOLAR

En la Figura 3 se representa la radiación solar incidente sobre la vivienda para un día típico de cada estación del año (Agencia Andaluza de la Energía, 2013), expresada mediante la irradiancia (W/m^2). Se observa cómo durante el verano se alcanzan los mayores niveles de irradiancia, debido a que el sol incide más perpendicularmente sobre la superficie terrestre de nuestra zona geográfica. Hay que destacar que también durante los meses de verano es cuando se cuenta con un mayor número de horas de sol. En invierno, se recibe menor irradiancia y el número de horas de sol es menor. Durante las estaciones de primavera y otoño, la irradiancia es muy parecida, siendo algo mayor en primavera. La irradiancia útil comienza aproximadamente a partir de las 8:00 horas en todas las estaciones del año, y finaliza entre las 18:00 horas del invierno y las 22:00 horas del verano.

4. DETERMINACIÓN DE LA SUPERFICIE ÓPTIMA DE PANELES SOLARES FV

4.1. CÁLCULO DE LA SUPERFICIE PARA EL AUTOCONSUMO

La superficie de paneles solares FV a colocar debe ser la adecuada para satisfacer las necesidades anuales de la vivienda. Hay que evitar disponer de energía acumulada al final del periodo de facturación, ya que la energía excedentaria vertida a la red no lleva aparejada ninguna contraprestación económica, y no puede recuperarse una vez finalizado el periodo de facturación. Estableciéndose la condición de que la energía consumida en un periodo de facturación (E_c) debe ser igual a la energía generada en el mismo periodo de facturación (E_{gen}), se obtiene la superficie para conseguir el autoconsumo mediante el uso de FV (S_{auto}). La Ecuación 1 muestra el cálculo de esta superficie.

$$S_{auto} = \frac{\sum_{i=1}^{365} e_{ci}}{\eta \cdot F_p \cdot \sum_{i=1}^{365} I_i} \quad (1)$$

donde e_{ci} es el consumo de energía en el día i , η es el rendimiento de los **módulos solares**, F_p es el factor de pérdidas, I_i es la irradiancia en el día i .

4.2. DÍA ÓPTIMO DEL COMIENZO DEL PERÍODO DE FACTURACIÓN

En la Figura 4a se muestra la evolución de la energía acumulada diaria durante el periodo de facturación de un año (con comienzo el 1 de enero), considerando la superficie S_{auto} . Se distinguen dos intervalos claramente diferenciados. Un intervalo inicial en el que no se dispone de energía acumulada, consumiéndose energía de la red a precio TUR cuando la demanda supera a la producción. Este intervalo comprende desde el primer día del periodo de facturación (1 de enero) hasta el día 78, correspondiente al 19 de marzo. El segundo intervalo comprende desde el día 79 hasta el último día del periodo, donde se dispone de energía acumulada en todo momento, y en consecuencia, el consumo de energía de la red siempre se realiza a precio de peaje. Destacar que al final de año se dispone de energía acumulada, la cual no se va a poder utilizar posteriormente ya que nuestro periodo de facturación ha finalizado. Esta energía sobrante que no se puede utilizar, se denomina energía perdida y coincide con la energía que se ha consumido de la red a precio TUR durante el primer intervalo, pues la superficie instalada (S_{auto}) produce la misma cantidad de energía anual que la demandada.

La Figura 4b, que complementa a la Figura 4a, muestra la energía acumulada al final del periodo de facturación en función del día de alta de la instalación para el autoconsumo. Se distinguen dos puntos de interés, el mínimo indica que no hay energía acumulada al final del periodo de facturación, alcanzándose cuando la instalación se da de alta el 19 de marzo. A partir de este día la producción de energía comienza a ser superior al consumo, garantizándose un consumo de energía a precio de peaje durante todo el periodo de facturación. La mayor energía acumulada al final del periodo y por tanto perdida, se produce en el máximo de la Figura 4b, que se corresponde con el alta de la instalación a mediados del mes de septiembre.

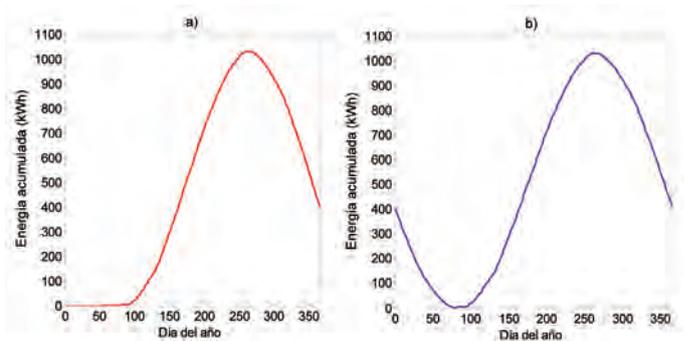


Fig. 4: a) Energía acumulada diaria a lo largo del año. b) Energía acumulada al final del periodo de facturación en función del día de alta en autoconsumo

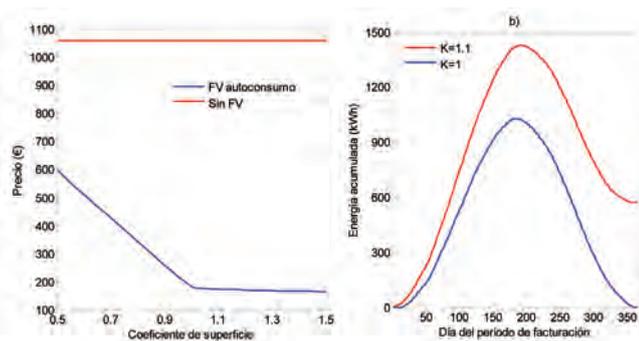


Fig. 5: a) Factura anual con y sin FV, b) Energía acumulada en la red

4.3. REPERCUSIONES DE LA VARIACIÓN DE LA SUPERFICIE INSTALADA

Con objeto de observar el comportamiento de la instalación cuando varía la superficie instalada, se define el coeficiente de superficie K como la relación entre la superficie real de paneles instalados (S_{real}) y la superficie determinada por el autoconsumo (S_{auto}).

$$K = \frac{S_{real}}{S_{auto}} \quad (2)$$

En la Figura 5a se ha representado la factura anual de energía consumida sin instalación FV ($F_{sin,FV}$) y la factura anual con instalación FV para autoconsumo (F_{FV}), ecuaciones (3) y (4) respectivamente. Los precios de peaje y TUR empleados son los que aparecen en la Tabla I, que posteriormente se justificarán.

$$F_{sin,FV} = E_c \cdot P_{TUR} \quad (3)$$

$$F_{FV} = E_{c,inst} \cdot 0 + E_{c,peaje} \cdot P_{peaje} + E_{c,TUR} \cdot P_{TUR} \quad (4)$$

donde E_c es el consumo total de energía de la vivienda, $E_{c,inst}$ es el consumo de energía instantánea y sin coste, $E_{c,peaje}$ es la energía consumida de la red a precio de peaje (P_{peaje}), y $E_{c,TUR}$ es el consumo de energía a precio TUR (P_{TUR}).

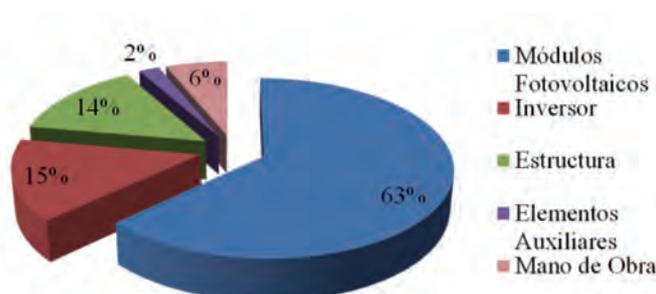


Fig. 6: Desglose de costes de la instalación FV

En la Figura 5a se pueden diferenciar dos zonas. Para $K < 1$, a medida que aumenta el valor del coeficiente de superficie se observa como la factura con FV va disminuyendo. Esto es debido a que cuanto mayor superficie de paneles dispongamos, mayor cantidad de energía es capaz de producir la instalación FV, y por tanto, menor cantidad de energía se consumirá a precio TUR . Para $K=1$, los paneles instalados consiguen generar la misma energía que la consumida por la instalación, y el coste de la factura es muy cercano al mínimo.

Para $K > 1$, a medida que se aumenta el coeficiente de superficie, la factura con FV se mantiene prácticamente constante debido a que las necesidades de autoabastecimiento han quedado ya cubiertas para $K=1$, y el exceso de producción de energía correspondiente a este aumento de superficie se vierte de forma gratuita a la red. El pequeño descenso que se produce en esta zona corresponde a un mayor consumo de energía instantánea a coste cero en detrimento de la energía consumida a precio de peaje. En la Figura 5b puede observarse cómo al final del periodo la energía acumulada para $K=1$ es cero, mientras que para $K=1,1$ se produce un exceso de producción de 580 kWh, que no son recompensados por la Administración.

5. ANÁLISIS DE RENTABILIDAD

En el análisis de rentabilidad de la nueva instalación se ha considerado que la facturación con autoconsumo se inicia en el día óptimo, y que la superficie de paneles instalados es igual a S_{auto} ($K=1$). Teniendo en cuenta que la vida útil de los paneles fotovoltaicos es de 25 años y con objeto de realizar un análisis de rentabilidad lo más real posible, el precio del término de la energía a lo largo de los 25 años de vida aumentará un 2% anual, de acuerdo a las previsiones realizadas por la Unión Española Fotovoltaica, UNEF (UNEF, 2012).

Adicionalmente, se comparará la nueva modalidad de facturación mediante el sistema del autoconsumo con la situación de facturación basada en primas existente en España hasta finales del 2011 (Ministerio de Industria, 2007). El precio fijado para este tipo de instalaciones a finales del 2011 era de 0,34097225 €/kWh (Ministerio de Industria, Energía y Turismo, 2011).

5.1. COSTE DE LA INSTALACIÓN

La Figura 6 muestra el desglose en porcentaje del coste de la instalación de los paneles FV. En el precio total de la instalación se incluye, además de los paneles, inversor de CC/CA, estructura de soporte de los paneles, elementos auxiliares como el cableado, y la mano de obra de instalación de los mismos. El coste de instalación asciende a 2,25 €/Wp instalado.

Los valores característicos asociados a la instalación se resumen en la Tabla I. En dicha tabla se indican los valores asociados a la vivienda, como son el consumo anual de energía (E_c) y la irradiancia (I) anual que recibe, junto con valores correspondientes a los paneles FV, como el factor de pérdidas (F_p), el rendimiento de los módulos (η) y el coste del vatíopico instalado. Empleando la Ecuación (1), se obtiene una superficie S_{auto} de 30,66 m².

Se ha decidido instalar una superficie de paneles FV constituida por 19 módulos de superficie unitaria 1,6269 m² y 230

Wp, lo que implica una superficie real de 30,91 m² (K= 1,008) y una potencia nominal de 4,37 kWp.

Parámetro	Valor
Consumo Anual de Energía (E _c)	5792,70 kWh
Irradiancia Anual (I)	1781,72 kWh/m ²
Factor de Pérdidas (F _p)	0,75
Rendimiento de los Módulos (η)	0,1414
Coste del vatio pico instalado	2,25 €/Wp
Superficie para el autoconsumo (S _{auto})	30,66 m ²
Superficie real (S _{real})	30,91 m ²
Coefficiente de superficie (K)	1,008

Tabla 1: Valores característicos de la instalación

5.2. INDICADORES DE RENTABILIDAD

Para el análisis de rentabilidad, se han empleado indicadores tales como el tiempo de retorno (T_R) y la tasa interna de rentabilidad (TIR). El T_R corresponde al número de años en el que la suma de los ahorros iguala a la inversión inicial realizada, expresada por la ecuación (5).

$$C_{FV} = \sum_{t=1}^{t=T_R} AH_{FV}^t \text{ para } t=1, 2, 3, \dots, T_R \quad (5)$$

donde C_{FV} es el coste de la inversión en euros y AH_{FV}^t es el ahorro obtenido en la facturación eléctrica en el año t con paneles FV.

La expresión que responde al cálculo del ahorro sería la siguiente:

$$AH_{FV}^t = F_{sin,FV}^t - F_{FV}^t \quad (6)$$

donde F_{sin,FV}^t es la factura anual sin instalación FV, y F_{FV}^t es la factura anual con la instalación FV, en el mismo año considerado, t.

Por otra parte, el TIR es la tasa de interés con la que se consigue un Valor Actual Neto (VAN) nulo, es decir, la renta-

bilidad anual de la inversión inicial durante la vida esperada del proyecto, que en el caso que nos ocupa es de 25 años. Se consideran proyectos rentables aquellos que tienen un TIR superior a una tasa de interés esperada. Si el VAN de un proyecto de inversión se calcula mediante la ecuación (7), siendo r la tasa de interés, el TIR se obtiene a partir de la ecuación (8).

$$VAN = \sum_{t=1}^{t=25} \frac{AH_{FV}^t}{(1+r)^t} - C_{FV} \quad (7)$$

$$0 = \sum_{t=1}^{t=25} \frac{AH_{FV}^t}{(1+TIR)^t} - C_{FV} \quad (8)$$

5.3. RESULTADOS

En la Figura 7 se representa la variación del TIR y del T_R de la inversión en función del coeficiente de superficie, para un precio del vatio-pico de 2,25 €/Wp, un precio inicial del término de la energía de 0,150938 €/kWh, correspondiente al precio de la energía del 1 de enero del 2013 (Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2012), con un incremento anual del 2% y un precio del peaje de 0 €/kWh. Se han representado los valores en el entorno de K=1.008 (19 paneles), con objeto de observar el comportamiento de los parámetros económicos. Se observan dos zonas claramente diferenciadas tanto en la variación del TIR como en el T_R.

En el primer tramo con K<1, la evolución de los parámetros económicos es prácticamente constante, presentando el TIR una suave bajada y el T_R una suave subida. Para justificar este comportamiento, hay que decir que se ha considerado el precio del vatio-pico instalado constante, lo que implica que la inversión inicial es proporcional a K, y dado que la generación de energía es también proporcional a dicho coeficiente, la rentabilidad de la inversión debe mantenerse constante. El pequeño descenso que se produce en el TIR al aumentar el coeficiente de superficie corresponde a un mayor consumo de energía a precio de peaje en detrimento del consumo de energía instantánea a coste cero, debido a que la generación es mayor y hay mayor cantidad de energía almacenada.

El segundo tramo de la Figura 7 corresponde a K>1. Se observa que el TIR disminuye rápidamente, debido a que toda la energía producida por el exceso de paneles se vierte directamente a la red sin compensación económica. El T_R sigue la misma tendencia que el TIR pero en sentido contrario.

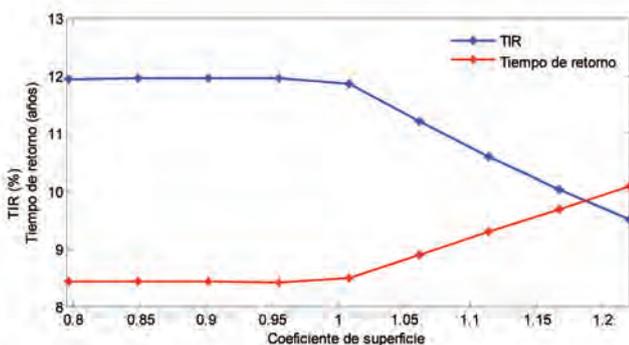


Fig. 7: TIR y T_R en función de K para un precio del peaje de 0 €/kWh

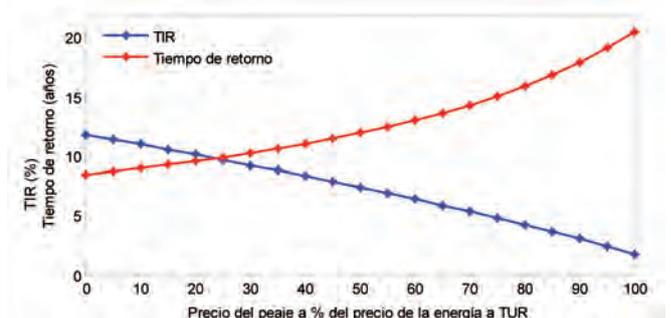


Fig. 8: TIR y tiempo de retorno, en función del precio del peaje en % del precio de la energía a TUR

Con los resultados obtenidos, la superficie S_{auto} ($K=1$) puede considerarse un valor límite a instalar, por encima del cual la rentabilidad de la inversión comienza a descender rápidamente. La instalación de un número de paneles inferior a este valor límite proporciona rentabilidades cercanas al 12% y tiempos de retorno de 8,4 años, lo que hace atractiva la inversión a largo plazo en esta modalidad sin intervención económica de la Administración.

En el sistema de facturación basado en primas, con el precio de la prima fijado a finales del 2011 y los costes de instalación actuales, se obtiene un TIR del 24,3% y un T_R de 4,1 años. Los parámetros económicos en esta modalidad hacen que la inversión sea claramente mucho más rentable debido a las elevadas primas por parte del Estado. El coste total de la subvención en la modalidad de primas durante los 25 años de vida de la instalación alcanzaría los 49.794 €.

El precio del peaje para recuperar la energía es una de las grandes incógnitas de la nueva modalidad de balance neto, pues aún no se conoce su valor y supondrá un factor clave para que la inversión sea o no rentable. Para analizar su impacto, en la Figura 8 se representa el TIR y el T_R para una instalación de 19 placas ($K=1,008$) y para distintos precios del peaje expresados en porcentaje del precio de la energía a TUR. Un valor del 100% supone que el precio del peaje es igual al precio a TUR, lo que implica que el coste de la energía recuperada es igual al precio de mercado y, por lo tanto, el almacenamiento y la propia modalidad de balance neto deja de tener sentido.

Esta reflexión nos obliga a proponer un precio máximo del peaje del 25% (0,0377345 €/kWh) para sufragar los costes de gestión del almacenamiento de la energía. Para este valor se obtiene un T_R de 9,95 años y un TIR del 9,72%, que aún puede considerarse una inversión atractiva a largo plazo. En la figura 8 se observa como el T_R aumenta y el TIR disminuye a medida que aumenta el peaje, hasta alcanzar los valores de 20,53 años y 1,78% respectivamente, para precios del peaje del 100%, valores inadmisibles y situación en la que el concepto de almacenamiento deja de tener sentido.

6. CONCLUSIONES

En este artículo se evalúa la rentabilidad del modelo de balance neto de energía en viviendas con instalaciones FV de pequeña potencia, considerando el proyecto de Real Decreto de 18 de noviembre de 2011. Las conclusiones obtenidas son las siguientes:

- La entrada en vigor de este RD de balance neto supondría el relanzamiento de las energías renovables, sector que actualmente presenta cierta paralización en España.
- La superficie de paneles FV que se debe instalar para conseguir el máximo ahorro, y por tanto, la máxima rentabilidad, debe cubrir como máximo sólo la demanda anual de la instalación, pues la energía excedentaria vertida a la red no recibe compensación económica. Este hecho implica que es especialmente importante obtener la curva de demanda real de la instalación.
- El día de comienzo del servicio de autoconsumo influye tanto en la amortización como en la energía acumulada, siendo el día óptimo del año aquel en el que la generación

comienza a ser superior al consumo, con el objetivo de tener siempre energía acumulada para poder recuperarla. Según la ubicación de la vivienda objeto de estudio debe ser el 19 de marzo.

- Se demuestra que la nueva modalidad de autoconsumo resultaría rentable a largo plazo para incrementos del precio de la energía del 2% anual propuesto por la UNEF y precios del peaje del 25% de la tarifa TUR, obteniéndose un TIR del 9,72% y un tiempo de retorno de 9,95 años, sin ningún coste para el Estado.
- El problema de la nueva regulación puede encontrarse en la gestión de la energía almacenada en la red, que tendría que adaptarse a la nueva situación.
- Los resultados del presente trabajo se han obtenido considerando un precio del vatio pico instalado de 2,25 €/Wp. Actualmente existe una tendencia claramente a la baja de este precio, por lo que es de esperar que en los próximos años se puedan conseguir valores del T_R y del TIR mucho más atractivos, convirtiéndose el autoconsumo en una apuesta sin riesgo para los consumidores de pequeña potencia.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Andaluza de la Energía. *Radiación solar* [en línea]. Disponible en web: <<http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/Radiacion/radiacion1.php>>. [Consulta: Julio 2012].
- Botero-B S y Morales-R CA. "Análisis del instrumento regulatorio "Medición Neta" (NET METERING) y su potencial. Aplicación al caso colombiano". *Energética*. Diciembre 2008. Vol. 40 p.53-65.
- Jefatura del Estado. Real Decreto-ley 1/2012, de 27 de enero, *BOE*, 28 de enero de 2012, núm. 24, p. 8068.
- Jefatura del Estado. Real Decreto-ley 20/2012, de 13 de julio. *BOE*, 14 de julio de 2012, núm. 168, p.50428.
- Jefatura del Estado. Real Decreto-ley 8/2010, de 20 de mayo. *BOE*, 24 de mayo de 2010, núm. 126, p. 45070
- Jefatura del Estado. Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto. *BOE*, 18 de septiembre de 2002, núm. 224, p. 33084.
- Ministerio de Industria, energía y Turismo. Orden IET/3586/2011, de 30 de diciembre. *BOE*, 31 de diciembre 2011, núm. 315, p. 146683.
- Ministerio de Industria Turismo y Comercio. Proyecto de Real Decreto por el que se establece la regulación de las condiciones administrativas, técnicas y económicas de la modalidad de suministro de energía eléctrica con balance neto. 2011.
- Ministerio de Industria Turismo y Comercio. Proyecto de Real Decreto por el que se establece la regulación de las condiciones administrativas, técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y de producción con autoconsumo. 2013.
- Ministerio de Industria Turismo y Comercio. Real Decreto 1699/2011, de 18 de noviembre. *BOE*, 8 de diciembre de 2011, núm. 295, p. 130033.
- Ministerio de Industria Turismo y Comercio. Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo. *BOE*, 26 de mayo de 2007, núm. 126, p. 22846.
- Ministerio de Industria Energía y Turismo. Resolución de 28 de junio 2012. *BOE*, 29 de junio de 2012, núm. 155, p. 46143.
- Red Eléctrica de España. *Demanda de energía en tiempo real* [en línea]. Disponible en: <<https://demanda.ree.es/demanda.html>>. [Acceso: Julio 2012]
- UNEF. Unión Española Fotovoltaica Balance Neto. *Requisitos para un autoconsumo viable en España* [en línea]. Disponible: <<http://www.jhroerden.com/solar/descargas/Rev%208%20a%20201202%20Balance%20Neto%20FINAL.pdf>>. [Acceso: Julio 2012.]

Reducción del ruido estructural y la vibración en un prototipo de cabina de ascensor mediante la unión adhesiva de paneles



STUDY OF THE ACOUSTIC ABSORPTION PROPERTIES OF PANELS MADE FROM GROUND TIRE RUBBERS

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5710> | Recibido: 15/01/2013 • Aceptado: 07/10/2013

Jon García-Barrueta¹, Fernando Cortés-Martínez¹, Inge Isasa-Gabilondo²

¹ UNIVERSIDAD DE DEUSTO (DEUSTO TECH). Facultad de Ingeniería. Avda. de las Universidades, 24 - 48007 Bilbao. Tfno: +34 944 139003. jgarcia.barrueta@deusto.es

² ORONA S.Coop. Dpto Ingeniería Mecánica. Pol. Lastaola - 20120 Hernani (Guipuzcoa). Tfno: +34 943 551400

ABSTRACT

- This paper presents an experimental study for the structural noise and vibration reduction in a cabin elevator by means of adhesive bonded joints of panels. For that noise and vibration measurements are carried out on two prototypes: one of them built with classical panel joining technologies and the other one with adhesive joints. First of all the mechanical properties (relaxation and complex moduli) of two low modulus materials are compared: a silane and a modified silane adhesives. These properties are obtained for both materials by means of dynamic mechanical thermal analysis technique (DMTA), the master curves under direct strain being built-up through a procedure based on the time-temperature superposition (TTS) principle. Next, the influence that these two materials have on the dynamic response of an adhesively bonded metallic beam is investigated, in order to select the right candidate according to design criteria. Finally, an application for an elevator cabin prototype is presented, in which noise and vibration are measured in order to put into evidence the benefits of joining panels by means of adhesive bonded joints in contrast to the traditional joining technologies.
- **Keywords:** Noise and vibration reduction, adhesive bonded joints, cabin elevator, modal analysis.

RESUMEN

Este artículo presenta un estudio experimental sobre la reducción de ruido estructural y de la vibración en una cabina de ascensor mediante el empleo de adhesivos en las uniones de los paneles laterales. Se llevan a cabo medidas experimentales de ruido y vibraciones en dos cabinas: una de ellas construida con uniones metálicas en los paneles y la otra mediante uniones adhesivas.

En primer lugar se comparan las propiedades mecánicas (módulo de relajación y módulo complejo) de dos adhesivos flexibles: concretamente, un silano y un silano modificado. Estas propiedades se obtienen para ambos materiales por medio de la técnica de análisis térmico mecánico dinámico (DMTA), donde las curvas maestras bajo sollicitaciones de tensión se obtienen aplicando un procedimiento basado en el principio de superposición tiempo-temperatura (TTS).

A continuación, se investiga la influencia que estos dos materiales adhesivos tienen en la respuesta dinámica de un espécimen de viga metálica con uniones adhesivas, con el fin de seleccionar el candidato adecuado de acuerdo a los criterios de diseño establecidos.

Por último, se presenta el ensayo experimental de un prototipo de cabina del ascensor, en el que se miden la presión sonora interior así como la vibración de los paneles laterales y del suelo. El objetivo es evidenciar las ventajas de la utilización de uniones adhesivas frente a uniones metálicas en los paneles laterales de una cabina de ascensor.

Palabras clave: Ruido y reducción de vibración, uniones adhesivas, cabina de ascensor, análisis modal.

1. INTRODUCCIÓN

En los sistemas de transporte de personas, el comportamiento vibroacústico del sistema determina en gran medida el confort de marcha y utilización. En general, una máquina o producto es confortable desde el punto de vista vibroacústico cuando los niveles de vibración y el ruido emitido durante el funcionamiento del equipo se encuentran dentro de unos límites establecidos [1]. El aumento de los niveles de confort es de primera importancia en aeronáutica [2], automoción [3,4], o en la industria del transporte vertical de personas [5,7], donde la percepción de seguridad y robustez, está intrínsecamente relacionada con los niveles de vibración en operación del equipo. Como denominador común de las industrias mencionadas se trata de sistemas complejos conformados por piezas en movimiento y sometidos a cargas dinámicas. Los

cerramientos se realizan generalmente por medio de paredes metálicas delgadas, rígidamente unidas a un marco o bastidor que proporciona rigidez al conjunto [8]. Esta configuración induce la vibración de esos paneles delgados en servicio, lo que lleva a la emisión de ruido estructural. El ruido estructural que generalmente se da por vibraciones de baja frecuencia, es una de las principales causas de la reducción en el confort de marcha.

Por lo tanto, en cualquier estructura sometida a cargas dinámicas, las uniones entre elementos son las responsables de la transmisión de ruido y vibración. En este sentido, el estudio se centra en las uniones y las tecnologías de unión.

Así, las tecnologías de unión tradicionales, como atornillado, remachado o soldadura, entre otros, han sido ampliamente estudiadas desde el punto de vista de su resistencia mecánica [9,10]. Sin embargo, estas tecnologías tradicionales tienen muy poco interés para el control de vibraciones, ya que sólo son capaces de introducir bajos niveles de amortiguación en algunos rangos de frecuencia específicos [11-16]. Por el contrario, las uniones adhesivas se utilizan para control de ruido estructural debido a su capacidad de introducir amortiguamiento modal efectivo por debajo de 1 kHz [16]. Además, hay que destacar que la mejora de la respuesta vibroacústica de una máquina o producto tiene una gran influencia en su ciclo de vida, máxime cuando el ruido y las vibraciones son las principales responsables de los fallos por fatiga [17]. Por lo tanto, el empleo de uniones adhesivas proporciona ventajas importantes [18].

Los materiales adhesivos se pueden clasificar en tres categorías desde el punto de vista de su comportamiento de tensión-deformación. Adhesivos rígidos, adhesivos tenaces y adhesivos flexibles. Por un lado, los adhesivos rígidos se utilizan para aplicaciones estructurales y tienen un mal comportamiento dinámico. Por otro lado, los flexibles (pueden citarse como ejemplos generales, siliconas, poliuretanos y adhesivos de silano modificados) exhiben una gran resistencia a pelado y a esfuerzos cortantes, así como a cargas dinámicas y de impacto. Por lo tanto, los adhesivos flexibles pueden contribuir a mejorar el confort de vibroacústico de marcha.

La Tabla 1 muestra una comparativa de las propiedades de algunos adhesivos flexibles. Así, en el presente estudio se consideran dos adhesivos flexibles (o módulo bajo) concretamente: un silano modificado del fabricante Bostik® llamado comercialmente ISR 70-03 y un silano del fabricante SIKA®, llamado comercialmente SIKAFLEX 505. Cabe enfatizar que los adhesivos flexibles pueden ser modelizados como materiales viscoelásticos [18]. En cuanto a la caracterización

de los materiales viscoelásticos, la técnica de análisis térmico mecánico dinámico (DMTA) permite tener en cuenta de manera conjunta la dependencia de estos materiales de la temperatura y del tiempo mediante la aplicación del principio de superposición tiempo-temperatura (TTS) [19,20]. Este principio relaciona la respuesta de material en un momento dado y a una temperatura dada con la correspondiente en otras condiciones suponiendo una relación de la forma

$$E(t, T) = E(t_0, a_T T_0), \quad (1)$$

donde T_0 y t_0 representan la temperatura y el tiempo de referencia, respectivamente. En el dominio del tiempo el *shift factor* queda $a_T = t/t_0$.

El objetivo del presente trabajo es poner de manifiesto los beneficios de una correcta elección de adhesivo para la reducción del ruido estructural y la vibración en una cabina del ascensor.

- En primer lugar, se presentan las propiedades mecánicas de los adhesivos.
- A continuación, estos dos adhesivos se ensayan en un banco de pruebas, en el que se analiza la transmisibilidad de la vibración por medio de un modelo experimental simplificado. Como resultado del análisis se selecciona un adhesivo.
- Por último, el adhesivo seleccionado se utiliza en un prototipo de cabina del ascensor para evaluar la reducción de ruido y vibración respecto al sistema con uniones metálicas.

2. SELECCIÓN DEL ADHESIVO

En esta sección, se estudia la respuesta de un espécimen viga con uniones adhesivas excitado sísmicamente para los dos adhesivos analizados. Para ello, se obtiene la función de

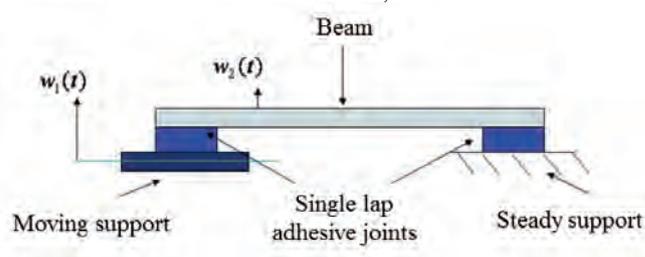


Fig. 1: Representación esquemática de los especímenes viga con adhesivo

	Siliconas	Poliuretanos	Silanos Modificados
Resistencia mecánica	Moderada	Excelente	Alta
Resistencia química	Moderada	Alta	Alta
Adhesión	Buena	Mala	Excelente
Resistencia UV	Buena	Mala	Buena
Salud y seguridad	Acetico: irritante	Isocianato: toxico	Excelente

Tabla 1: Propiedades de siliconas, poliuretanos y silanos modificados

transmisibilidad entre la aceleración impuesta a la base del adhesivo y la respuesta en aceleración de un punto específico de la viga. Una vista esquemática del experimento se muestra en la Fig. 1, en la que se representa el movimiento de la base $w_1(t)$ y el punto de medición de la respuesta de la viga $w_2(t)$.

A partir de estas funciones de transmisibilidad se estudia la i^{th} frecuencia de resonancia f_i , amplitud pico A_i y el factor de amortiguamiento modal h_i .

2.1. MATERIALES Y ESPECÍMENES

En el presente estudio se consideran dos materiales adhesivos flexibles: un silano modificado llamado comercialmente ISR 70-03 y un silano, llamado comercialmente SIKAFLEX 505. La resistencia a la tracción para ambos materiales son 2,60 MPa [21] y 1,55 MPa [22], respectivamente. Los módulos de relajación y complejo de estos adhesivos se obtuvieron [23,24] por medio de la técnica de análisis térmico mecánico dinámico (DMTA). Las curvas maestras de relajación y dinámica bajo esfuerzos de tracción se obtuvieron mediante un procedimiento [25] basado en el principio de superposición de tiempo-temperatura [20]. La Fig.2 representa (a) el módulo de relajación y (b) el módulo complejo para ambos materiales.

De la Fig. 2 (a), es importante señalar que el módulo de relajación de ISR 70-03 es dos veces más alto que el de SIKAFLEX 505. Debe tenerse en cuenta también el bajo tiempo de relajación asociado a ambos adhesivos flexibles. Sin embargo, el tiempo de relajación del ISR 70-03 es menor que el de SIKAFLEX 505. Además, debe señalarse que el módulo relajado experimental [19] del ISR 70-03 es tres veces menor que el de SIKAFLEX 505. A partir de la Fig. 2 (b) es preciso señalar que el adhesivo SIKAFLEX 505 presenta un módulo de almacenamiento inferior al del ISR 70-03, pero por el con-

Material	Longitud de solape (mm)	Espesor de la unión (mm)
	Lado excitación / Lado fijo	Lado excitación / Lado fijo
ISR 70-03	39.0 / 36.0	1.1 / 1.1
SIKAFLEX 505	36.5 / 38.5	1.2 / 1.3

Tabla II: Dimensiones de las uniones de los especímenes viga analizados

trario, el SIKAFLEX 505 tiene un factor de pérdida menor en todo el rango de frecuencia.

Las vigas metálicas están fabricadas de acero inoxidable y se obtuvieron de la misma plancha mediante corte por agua con el objetivo de asegurar propiedades homogéneas y especímenes no deformados. La longitud, anchura y espesor medidos son . Las dimensiones del espécimen viga (espesor y longitud de solape de la unión) se muestran en la Tabla II.

2.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En la Fig. 3 se muestra un esquema del set-up experimental (excitación del sistema, adquisición de datos y el propio espécimen viga), donde los detalles del equipo de adquisición se recogen en la Tabla 3.

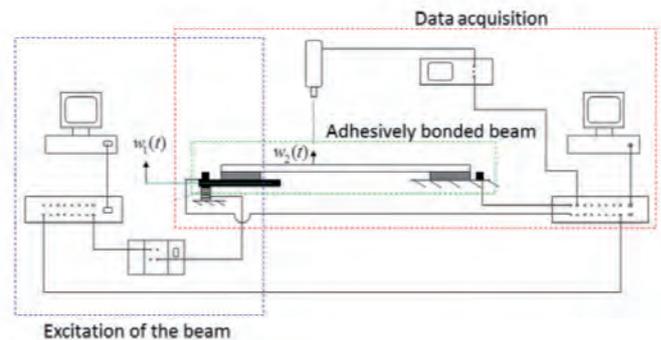


Fig. 3: Esquema del set-up experimental

El movimiento se impone a la base de la viga por un actuador piezoeléctrico PPA40M de CEDRAT Technologies [26]. Este dispositivo se controla por medio de una tarjeta de control DS1104 dSPACE en tiempo real [27], donde el programa de control se desarrolló en Simulink® [28]. La adquisición y procesamiento de datos se realizaron con un sistema de adquisición PULSE de Brüel&Kjær [29]. Se emplearon dos sensores para medir la respuesta: un acelerómetro triaxial ICP 356A16 de PCB electronics [30] y un interferómetro láser OFV-505 de POLYTEC [31] cuya señal de respuesta en velocidad se deriva y se obtiene la aceleración correspondiente.

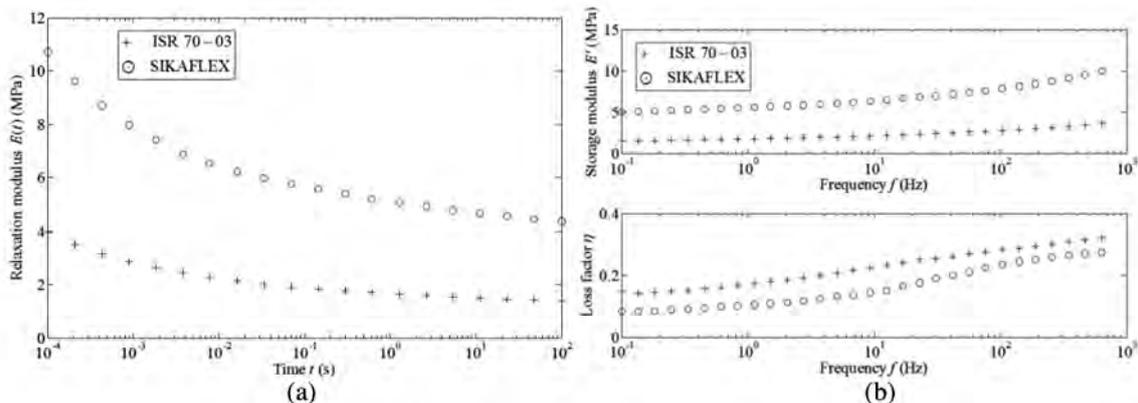


Fig. 2: Módulos de los materiales ensayados: (a) módulo de relajación $E(t)$, (b) módulo complejo $E^*(w)$.

2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN: SELECCIÓN DEL ADHESIVO

Las funciones de transmisibilidad $T(w)$ obtenidas de los especímenes viga se muestran en la Fig. 4. Las frecuencias de resonancia f_i , las amplitudes pico A_i y los factores de pérdida modal h_i para las dos especímenes analizados se recogen en la Tabla 3.

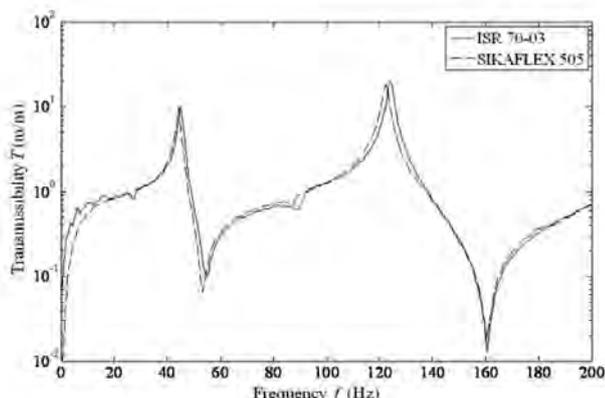


Fig. 4: Funciones de transmisibilidad para los dos especímenes con diferente tipo de adhesivo

A partir de la Fig. 4, puede concluirse que cuanto mayor es el módulo del material adhesivo (véase la Fig. 2), mayores son las frecuencias de resonancia. Así, las frecuencias de resonancia para el caso 70-03 ISR son ligeramente más altas (en torno a 1,20 % para ambos modos) que las obtenidas para el espécimen con SIKAFLEX 505. En cuanto a la amplitud de la respuesta, el espécimen con ISR70-03 proporciona una respuesta dinámica ligeramente más alta (entre 7% y 8% para ambos modos). Respecto al factor de pérdida modal, cabe destacar que, en relación con el primer modo, es 16 % más alto para el ISR 70-03, mientras que para segunda resonancia, el factor de mayor pérdida corresponde al espécimen con SIKAFLEX 505 (19 %).

En resumen, con el objetivo de seleccionar al candidato adecuado para la aplicación de ruido estructural se han tenido en cuenta tres aspectos:

- Propiedades mecánicas generales, concretamente, rigidez y resistencia;
- Propiedades mecánicas específicas, concretamente, los módulos de relajación y complejo (véase la Fig. 6);
- Comportamiento dinámico *in situ* (ver Fig. 4 y la Tabla III).

En cuanto a las propiedades mecánicas, el SIKAFLEX 505

presenta un factor de pérdida mayor que el ISR 70-03. En realidad, el factor de pérdida de material del SIKAFLEX 505 es dos veces mayor que el de ISR 70-03, al menos en el rango analizado. Sin embargo, su módulo de almacenamiento (y en consecuencia su módulo de relajación) son mucho más bajos que el del ISR 70-03. Además, el módulo relajado del SIKAFLEX 505, es cuatro veces menor que el correspondiente al ISR 70-03.

Respecto al comportamiento *in-situ*, no se encuentran diferencias significativas en las frecuencias de resonancia entre los dos candidatos (menos de 2 %). Respecto a las amplitudes, el espécimen con SIKAFLEX 505 presenta una respuesta ligeramente mejor donde se verifican diferencias de hasta el 7 %. Sin embargo, en relación con el factor de pérdida el ISR 70-03 presenta mejores resultados para el primer modo, mientras el SIKAFLEX 505 presenta un valor más alto para el segundo modo.

Se puede concluir por tanto que el ISR 70-03 es el candidato adecuado para la aplicación industrial. Esta elección se basa en el hecho de que un factor de pérdida alto no implica directamente una alta amortiguación del sistema. De hecho, la rigidez y resistencia del material adhesivo tiene mucha mayor relevancia debido a su influencia en el equilibrio del sistema ya que el comportamiento dinámico estará determinado por la rigidez de las uniones. Además, la rigidez estática del material y su resistencia [21] son determinantes para la aplicación industrial en cuestión.

3. MEDIDAS DE RUIDO Y VIBRACIÓN EN EL PROTOTIPO DE CABINA DE ASCENSOR

Con el objetivo de comprobar la influencia de las uniones adhesivas en el ruido estructural interior en cabinas de ascensores, se diseñó y llevó a cabo un experimento en una torre de pruebas propiedad de ORONA S.COOP. Concretamente, se llevaron a cabo dos conjuntos de mediciones en condiciones de funcionamiento. Primero en la configuración del sistema original y segundo una configuración prototipo con uniones adhesivas en solape simple fabricadas con el silano modificado ISR 70-03. En cada configuración se realizaron medidas simultáneas de ruido y vibración. Así, se midió el nivel de presión sonora interior en el centro de la cabina a una altura de 1,5 m y enfocando al panel lateral trasero. Simultáneamente, se midió la respuesta vibracional del propio panel junto con las aceleraciones del suelo de cabina en dirección x, y y z, respectivamente. Un esquema de ambos sistemas se muestra en la Fig. 5, donde la Fig. 5(a) representa la posición de las uniones metálicas, la Fig. 5(b) muestra el sistema con las uniones adhesivas continuas en solape simple y la Fig. 5(c) los puntos de medición experimentales empleados.

Especímen	Modo 1			Modo 2		
	f_1 (Hz)	A_1 (m/m)	h_1	f_2 (Hz)	A_2 (m/m)	h_2
ISR 70-03	45.0	10.3	0.027	124.0	20.31	0.016
SIKAFLEX 505	44.5	9.52	0.023	122.5	18.70	0.018

Tabla III: Resultados modales para los dos especímenes viga con adhesivo

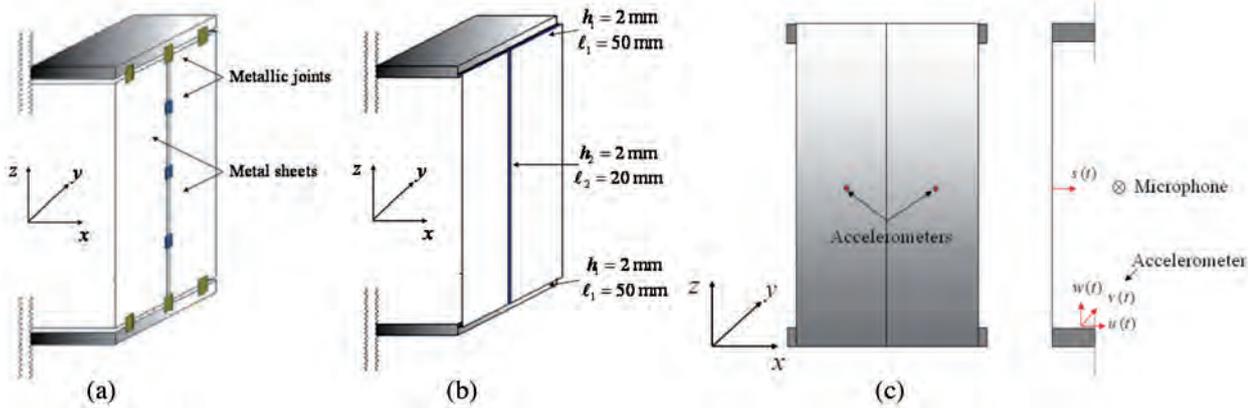


Fig. 5: Esquema del ascensor: (a) original con uniones metálicas, (b) prototipo con uniones adhesivas, (c) puntos de medida

La comparación de las respuestas operacionales se lleva a cabo en el rango de frecuencia 5 Hz–1 kHz. Las respuestas de la cabina de ascensor con uniones metálicas se comparan con las del sistema con uniones adhesivas donde se empleó el adhesivo ISR70-03. En primer lugar, el nivel de presión sonora se analiza junto con el autoespectro de aceleración del panel lateral (ver Fig. 5). A continuación, se estudian los auto-espectros de aceleración en dirección x, y, z del suelo de cabina. Con el objetivo de evitar diferencias locales entre dos sistemas virtualmente diferentes, los resultados se presentan y analizan en bandas de tercio de octava.

3.1. RUIDO ESTRUCTURAL

A continuación, se presenta el nivel de presión sonora en el interior de la cabina junto con el auto-espectro de vibración

de la parte derecha del panel trasero, siendo análogo el del lado izquierdo (ver Fig. 5). Por lo tanto, la Fig. 6(a) muestra el nivel de presión sonora interior del sistema con uniones metálicas y el correspondiente para el sistema con uniones adhesivas. Los resultados se presentan mediante la ponderación A [32]. La Fig.6 (b) muestra la aceleración de ambos espectros.

De la Fig. 6, puede concluirse que la respuesta vibroacústica de una cabina de ascensor se puede mejorar mediante la unión adhesiva de los paneles laterales. Así, conforme a la Fig. 6(a), el nivel de presión sonora se ha reducido para todas las bandas de frecuencia a excepción de la de 100 Hz. Pequeños incrementos se pueden encontrar también para las bandas de frecuencias más bajas. No obstante, se ha determinado el nivel total de presión sonora para ambos sistemas, siendo de $L_{p,metal} = 72.27$ dB para el sistema con uniones metálicas

		$\ddot{s}_{RMS} (m/s^2)^2$	$\ddot{u}_{RMS} (m/s^2)^2$	$\ddot{v}_{RMS} (m/s^2)^2$	$\ddot{w}_{RMS} (m/s^2)^2$
$f < 100$ Hz	Metálicas	1.82	1.06	0.83	2.03
	Adhesivas	1.48	0.86	0.76	1.72
$100 \text{ Hz} < f < 1 \text{ kHz}$	Metálicas	3.64	3.23	3.02	3.50
	Adhesivas	2.53	2.00	1.89	2.44

Tabla IV: Resultados vibracionales de los ascensores ensayados

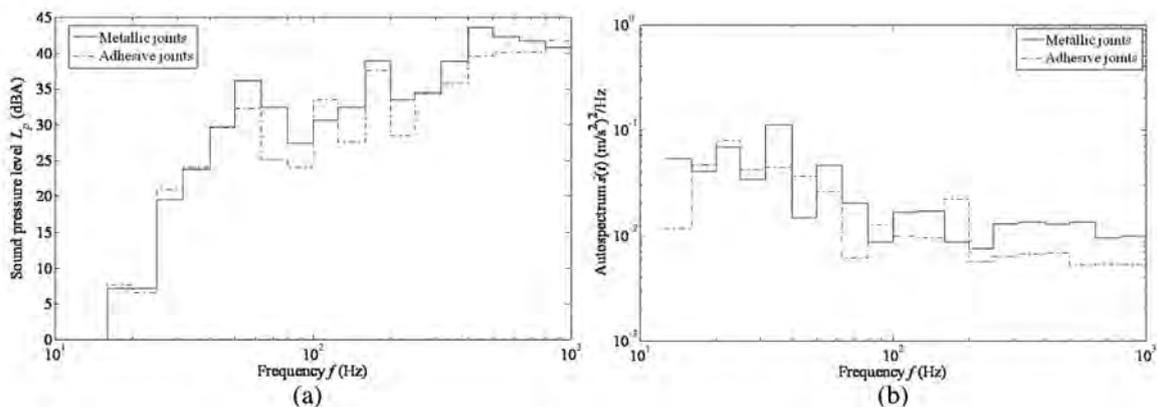


Fig. 6: Respuesta de ruido estructural: (a) niveles de presión sonora, (b) auto-espectro de $\ddot{s}(t)$

y $L_{p,adh} = 71.80$ dB para el sistema con uniones adhesivas. Sin embargo, aplicando la ponderación A [32] para tener en cuenta el oído humano, se obtienen $L_{p,metal} = 50.89$ dB(A), y $L_{p,adh} = 49.59$ dB(A) respectivamente.

Por lo tanto, se puede concluir que el nivel de presión sonora interior ha sido reducido mediante el empleo de uniones adhesivas obteniéndose una reducción de $\Delta L_p = 1.30$ dB(A). Hay que destacar que, para el presente caso, sólo uno de los tres paneles laterales se ha unido mediante uniones adhesivas.

Respecto a la Fig. 6(b) se debe tener en cuenta que el sistema con uniones metálicas contiene los niveles de vibración más altos en el rango de baja frecuencia, especialmente para frecuencias inferiores a 100 Hz. Así, es importante señalar que estos niveles de vibración son un orden superior a los de las frecuencias más altas. Con el fin de evaluar la eficacia de la solución aportada, se ha calculado la aceleración RMS, donde el resultado se muestra en la Tabla IV. El estudio se lleva a cabo teniendo en cuenta dos grupos de frecuencia: el primero conformado por las bandas de frecuencias inferiores a 100 Hz y el segundo por las bandas de frecuencias entre 100 Hz y 1 kHz.

De la Tabla IV, cabe destacar que los niveles de vibración en el panel lateral se han reducido un 20% y un 30% en la banda de baja y alta frecuencia respectivamente. En resumen, puede concluirse que las uniones adhesivas son capaces de reducir el ruido estructural en una cabina de ascensor al introducir amortiguamiento modal en los paneles laterales.

3.2. RESPUESTA VIBRACIONAL DEL SUELO

A continuación se analizan los espectros de vibración del suelo de la cabina. El objetivo de este análisis es verificar si los niveles de confort se han visto afectados por el uso

de uniones adhesivas. La Fig. 7(a), Fig. 7(b), and Fig. 7(c) muestran los autoespectros de aceleración para $\ddot{u}(t)$, $\ddot{v}(t)$ and $\ddot{w}(t)$, respectivamente, para el sistema con uniones metálicas y para el sistema con uniones adhesivas.

A partir de la Fig. 7 debe señalarse que, los niveles de vibración más altos se encontraron para las frecuencias inferiores a 100 Hz. En cuanto a la Fig. 7 (b) y la Fig. 7 (c) debe remarcarse que el nivel de vibración más pequeña se encuentra para el rango de frecuencia media. Así, se debe mencionar que el nivel de aceleración en la dirección z, ver Fig. 7 (c), es un orden de magnitud mayor que los de x e y. Los valores de la aceleración RMS obtenidos para los sistemas con uniones metálicas y uniones adhesivas se muestran en la Tabla IV. Los resultados se muestran igualmente en dos bandas de frecuencia. De la Tabla IV, se debe señalar que, a pesar de que únicamente se ha unido el panel trasero con material adhesivo, su efecto sobre la respuesta vibratoria de la base de cabina es significativo. Así, para la vibración horizontal se obtiene una reducción de hasta el 40%, mientras que el nivel de vibración vertical se ha reducido en 30%.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha presentado un estudio de la reducción del ruido y las vibraciones en un prototipo de cabina del ascensor por medio de la unión adhesiva de los paneles laterales. Para ello, se han comparado dos adhesivos de bajo módulo para aplicaciones de control de vibroacústico. Estos dos materiales son un silano y un silano modificado. Por un lado, se han analizado sus propiedades, concretamente, el módulo de relajación y el módulo complejo. Estas propiedades

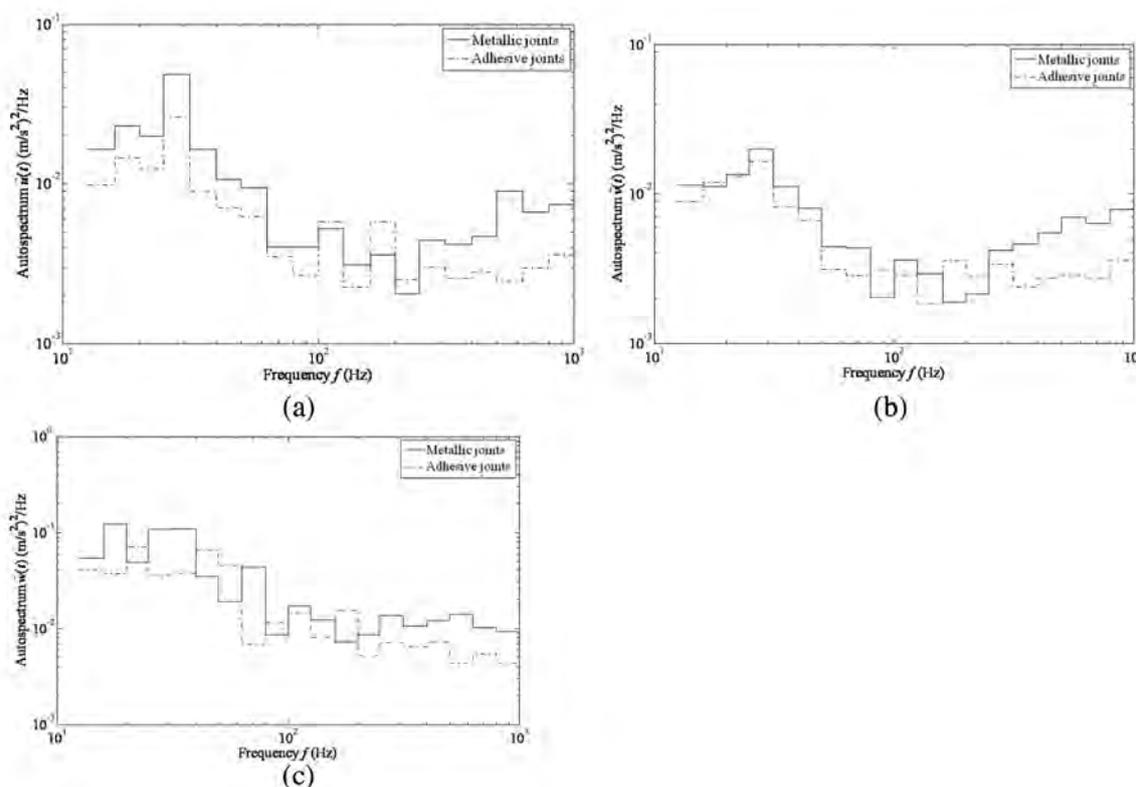


Fig. 7: Auto-espectros aceleración del suelo de cabina: (a) dirección x, (b) dirección y, (c) dirección z

se obtuvieron para ambos materiales por medio de la técnica de análisis térmico mecánico dinámico (DMTA), donde las curvas maestras bajo sollicitaciones tensión se han construido a través de un procedimiento basado en el principio de superposición de tiempo-temperatura (TTS). Por otra parte, se ha investigado su influencia sobre la respuesta dinámica de una viga metálica unida mediante adhesivo con el fin de seleccionar el candidato adecuado de acuerdo a los criterios de diseño establecidos. Por último, se ha realizado una aplicación sobre un prototipo de cabina del ascensor con el objetivo de poner de manifiesto los beneficios de la solución propuesta en contraste con la clásica.

Cabe destacar que, a pesar del hecho de que el factor de pérdida del SIKAFLEX 505 es el doble que el del adhesivo ISR 70-03 ambos especímenes ensayados presentan factores de pérdida modales muy similares. Respecto al demostrador, cabe destacar que se ha reducido el nivel de ruido interior de la cabina del ascensor prototipo. De manera análoga, el nivel de vibración del panel lateral se ha reducido significativamente en las bandas de alta y baja frecuencia. Además, el nivel de vibración del suelo de cabina del ascensor se ha reducido también.

Como conclusión, y a tenor de los resultados obtenidos, el confort de marcha de una cabina de ascensor puede ser notablemente mejorado mediante la sustitución de las tecnologías de unión tradicionales por uniones adhesivas.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado en esta investigación ha sido desarrollado con la generosa financiación de ORONA EIC.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bandini M., Governi L. "Optimal design of damping material distribution in dynamically excited panels". Proceedings of the 2002 International Conference on Noise and Vibration 2002 Leuven (Belgium). 2002. Vol.1 p.441-449.
- [2] Mucchi E., Pierro E., Vecchio A. "Experimental Guidelines for NVH Improvements in Helicopter". ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference Vibro-Acoustic Comfort 2009.
- [3] Rao M.D. "Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes". Journal of Sound and Vibration. 2003. Vol.262 p.457-474. DOI: 10.1016/S0022-460X(03)00106-8
- [4] Balmès E., Sylvain G. "Tools for viscoelastic damping treatment design. Application to an automotive floor panel". International Conference on Noise and Vibration Engineering ISMA02. 2002.
- [5] Lorsche G.P. "Analysis of elevator ride quality, vibration". Elevator World. June 2003. p108-113.
- [6] Mehr D. "Lift ride quality measurement". Elevatori. September-October 2004. Vol.5 p.34-47.
- [7] Consortium O. "General presentation of OSCAR: Optimisation of structural Connections for noise and vibration reduction". ISMA 25 2000. p813-816.
- [8] Bonifacio P., Lenzi A. "Experimental analyses of thin plates with different boundary conditions". 12th International Congress of Sound and Vibration ICSV12. 2005.
- [9] Chang D.J., Muki R. "Stress distribution in a lap joint under tension-shear". International journal of solids and structures. 1974. Vol.10 p.503-517. DOI: 10.1016/0020-7683(74)90055-9
- [10] Simon J., Johnson E., Dillard D.A. "Characterizing dynamic fracture behavior of adhesive joints under Quasi-Static and Impact Loading". Journal of ASTM international. 2005. Vol.2(7) p53-72. DOI: 10.1520/JAI12955
- [11] Feng L. "An experimental method to determine vibroacoustic properties of joints". Euro Noise International INCE Symposium. 1998. p.1-6.
- [12] Feng L. "Characterization methods and ranging of mechanical joints". ISMA05. 2000. p.793-800.
- [13] Feng L. "An experimental method for vibrational insertion loss of mechanical joints". Acta acústica ACUSTICA 2001. Vol.87 p.191-198.
- [14] Feng L., Liu M. "Experimental study of structure-borne sound transmission loss of mechanical joints". Acoustical Society of America 2001. Vol.110(3) p.1391-1397.
- [15] Feng L. "Vibration reduction through joints in finite systems". Proceedings Inter Noise. 1998. Vol.43 p.655-670.
- [16] Zatarain M., Villasantea C. "New light and highly-damped bonded structures for noise and vibration reduction". Cirp Annals. 2007. Vol.53(1) p.345-348.
- [17] Cieslik J.B. "Evaluation of vibration energy flow in assembled structures". EURONOISE 2006. Vol.1 p.1-6.
- [18] Hahn G.T., Iyer K.A., Rubin C.A. "Structural shear joints". Woodhead Publishing limited. 2005.
- [19] Ferry, J.D. Viscoelastic properties of polymers, (Wiley (ed.), Wiley, 1980).
- [20] Williams, M., Landel, R. and Ferry, J., *J. of the Am. Chem. Soc.* 77, 3701-3707 (1955).
- [21] Bostik industry, technical sheet for Industrial Special Range (ISR) 70-03. English version <<http://www.bostikindustrie.nl>>. Consulted on 15th of December of 2010.
- [22] Sika corporation U.S., product data sheet for SIKAFLEX-505. English version <<http://usa.sika.com/>>. Consulted on 15th of December of 2010.
- [23] García-Barrueta J., Cortés F., Abete J.M., Fernández P., Lamela M.J., Fernández-Cantelli A. "Experimental characterization and modelization of the relaxation and complex moduli of a flexible adhesive". Materials and Design. 2011. Vol. 32 p.2783-2796.
- [24] García-Barrueta J., Cortés F., Abete J.M. "A low modulus adhesive characterization by means of DMTA test". The Journal of Adhesion. 2012. Vol. 88:4-6 p.487-498.
- [25] García-Barrueta J., Cortés F., Abete J.M., Fernández P., Lamela M.J., Fernández-Cantelli A. "Relaxation modulus - complex modulus interconversion for linear viscoelastic systems". Mechanics of Time Dependent Materials. 2013. Vol.17 p.465-479.
- [26] Cedrat technologies, technical sheet for piezo-actuators and electronic devices. English version <<http://www.cedrat.com>>. Consulted on 15th of February of 2010.
- [27] dSPACE. English version <<http://www.dspaceinc.com>>. Consulted on 23th of February of 2010.
- [28] MATLAB Version 7.4.0. Natick, USA: The Mathworks Inc, 2007.
- [29] Brüel & Kjaer. Brüel & Kjaer Sound & Vibration Measurement A. English version <<http://www.bks.com>>. Consulted on 15th of January of 2010.
- [30] PCB electronics. English version <<http://www.pcb.com>>. Consulted on 11th of January of 2010.
- [31] POLYTEC. English version <<http://www.polytec.com>>. Consulted on 16th of January of 2010.
- [32] Bies D., Hansen C. Engineering noise control: theory and practice. Spon Pr, London, 2003. ISBN 0-203-87240-1.

- 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 y deberán cumplir los siguientes requisitos:
 - Título en castellano e inglés de 150 caracteres máximo
 - Un breve resumen (Abstract), de unas 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.
- Papers should be written in Spanish or English and should fulfil the following requirements:
 - Title in both English and Spanish with a maximum length of 150 characters.
 - Brief Summary or Abstract, about 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).

DYNA

Ingeniería e Industria



PROMOCIÓN: Suscripción a DYNA por 29,70 €/año

Reciba la revista dyna impresa en su domicilio por solo 29,70 €/año

La revista DYNA ha llegado a un acuerdo de colaboración con algunos Colegios de Ingenieros Industriales para ofrecer a sus colegiados la revista impresa con un 35% de descuento.

Promoción válida para los Ingenieros Industriales colegiados en:

Araba, Andalucía Occidental, Andalucía Oriental, Asturias, León, Bizkaia, Burgos y Palencia, Canarias, Cantabria, Extremadura, Galicia y Murcia.

Si está interesado, envíe un email a dyna@revistadyna.com mencionando que se acoge a la promoción e indicando su nº de colegiado y el nombre de su Colegio de Ingenieros Industriales.

Fresco es mejor que Frío



 **BIOCOOL**
ECO Cooling Solutions

¡Descubre la bioclimatización!

Tan fresca como la brisa del mar y casi tan económica

- **Máximo ahorro energético** y de instalación.
- **Aplicación industrial y residencial**, especialmente indicado en colegios, centros comerciales, instalaciones deportivas, almacenes y naves.
- **Saludable.** Mantiene un grado de humedad ideal que podemos controlar.

- El aire generado es de óptima calidad, **se renueva constantemente** del exterior purificando el ambiente.
- **Sostenible y ecológico:** No utiliza gases refrigerantes, no daña la capa de ozono y su consumo energético es mínimo.
- **Refresca** sin necesidad de cerrar puertas ni ventanas.

902 367 422
www.biocool.info