

DYNA

ingeniería e industria #3

www.revistadyna.com

Año 92 | N°3 | Mayo - Junio 2017

LIDAR 3D para guiado de vehículos autónomos

El profesorado de ingeniería y arquitectura en el espacio europeo de educación superior

Apoyos antisísmicos de neopreno para puentes

Evolución de las escaleras mecánicas

Realidad aumentada en los negocios y la educación

Metamateriales



9 770012 736006

03



Revista de Ingeniería Multidisciplinar con factor de impacto en JCR

ISSN 0012-7361 | DOI: 10.6036/DYNAII | SICL: 0012-7361(20170501)92:3<>1.0.TX;2-7 | CODEN: DYNAAU



TRESCA
ENGINEERING SOLUTIONS

BUENOS COMPAÑEROS DE VIAJE

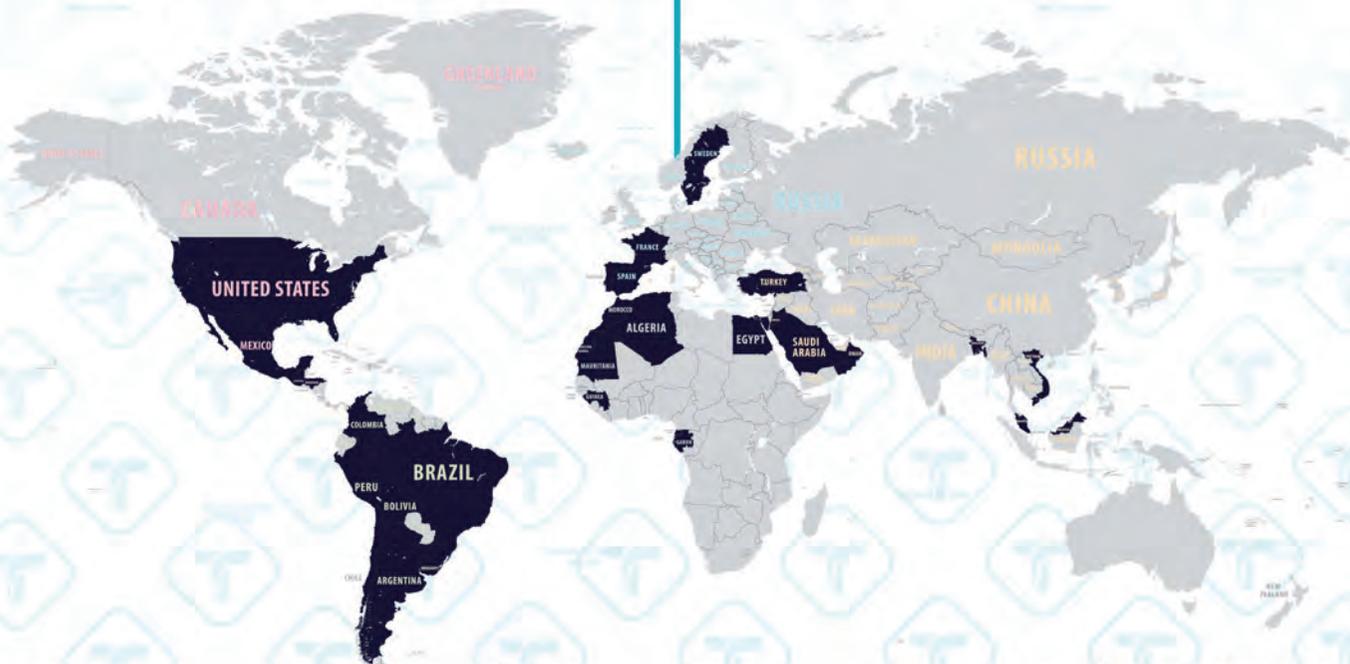
¿TE ACOMPAÑAMOS EN TU PRÓXIMO PROYECTO INTERNACIONAL?

> SECTORES

ENERGÍA
PLANTAS INDUSTRIALES
MINERÍA
INDUSTRIA QUÍMICA
INDUSTRIAL DEL CEMENTO
MADERA Y CELULOSA
HANDLING DE SÓLIDOS

> SERVICIOS

INGENIERÍA INTERNACIONAL
INGENIERÍA DE APOYO A EPC
INGENIERÍA BÁSICA
INGENIERÍA DE DETALLE
MODELOS Y MAQUETAS EN 3D
APOYO A LICITACIONES INTERNACIONALES



> INGENIERÍA ELÉCTRICA

> INGENIERÍA CIVIL

> INGENIERÍA MECÁNICA

CONÓCEMOS EN:
www.tresca.es



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.

La entidad editora Publicaciones DYNA también publica otras 3 revistas especializadas: DYNA Energía y Sostenibilidad (www.dyna-energia.com), DYNA Management (www.dyna-management.com) y DYNA New Technologies (www.dyna-newtech.com).

<http://www.revistadyna.com>

dyna@revistadyna.com

CONSEJO DE ADMINISTRACIÓN

Presidente de Honor: Luis Manuel Tomás Balibrea (FAIE - Madrid)
Presidente: Luciano Azpiazu Canivell (Asociación de Bizkaia - Bilbao)
Vicepresidente: Enrique Macián Cardete (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), Manuel Villalante LLauradó (Asociación de Catalunya - Barcelona), Germán Ayora López (Asociación de Andalucía Occidental - Sevilla), Francisco Cal Pardo (Asociación de Madrid - Madrid), Manuel Lara Coira (Asociación de Galicia - Santiago), Luis Soriano Bayo (Asociación de Aragón), José Antonio Muñoz Argos (Asociación de Cantabria - Santander).

OTROS SOCIOS

José Miguel Muñoz Veiga (Asociación de la Comunidad Valenciana), José Isidoro Marín Torrens (Asociación de la Región de Murcia), 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), Ginés Moratalla Valero (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 de León).

CONSEJO DE REDACCIÓN

Presidente: Ignacio Fernández de Aguirre Guantes (Instituto de Fundición Tabira - Durango)
Vicepresidente: Néstor Goicoechea Larracochea (Universidad del País Vasco - Bilbao)
Secretario: Carlos López de Letona (Asociación de Bizkaia - Bilbao)

Vocales:

Alfonso Parra Gómez (Asociación de Bizkaia - Bilbao), Angel Arcos Vargas (Universidad de Sevilla - Sevilla), Eduardo Valle Peña (Asociación de Cantabria - Santander), Franck Giroit (Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers - Paris, Francia), Angel Mena Nieto (Universidad de Huelva - Palos de la Frontera), José Manuel Palomar Carnicero (EPS Jaén - Jaén), José María Bueno Lidón (Green Power Tech - Sevilla), José Rafael Castrejón Pita (Queen Mary University of London - London, UK), Manuel Lara Coira (Escuela Politécnica Superior de Ferrol - Ferrol), Nicolás Gaminde Alix (Asociación de Bizkaia - Bilbao), Mikel Sorli Peña (Asociación de Bizkaia - Bilbao), Pere Alavedra Ribot (Universidad Internacional de Catalunya - Barcelona).

CONSEJO ASESOR

Alberto Del Rosso (Universidad Tecnológica Nacional - Buenos Aires, Argentina), Andrés Ortuño Carbonell (Asociación de Murcia - Murcia), Antonio Adsuar Benavides (Conselleria de Industria Comercio e Innovación - Valencia), Allan Joseph Wailoo (Universidad de Sheffield - Sheffield, UK), Blas Hermoso Alameda (Universidad Pública de Navarra - Pamplona), Fernando Guíjarro Merelles (Universidad de Extremadura - Cáceres), Fernando López Rodríguez (Agencia Extremeña de la Energía - Cáceres), Ferrán Puerta Sales (Universidad Politécnica de Cataluña - Barcelona), Roberto Uribeetxeberria (Universidad de Mondragón - Mondragón), Eva Martínez Caro (Universidad Politécnica de Cartagena - Cartagena), Javier Santos García (Universidad de Navarra - San Sebastian), Joan L. Serarols Font (Universidad de Girona - Girona), Jorge Arturo Del Ángel Ramos (Universidad Veracruzana - Veracruz, México), Juan M. Gers (Gers USA LLC - Weston, Florida, USA), Ricardo Rodríguez Jorge (Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez - Juárez, México), Erik Ocaranza Sánchez (Instituto Politécnico Nacional - Tlascala, México), Joshué Manuel Pérez Rastelli (Tecnalia - Bilbao, España) - Lina Montuori (Universidad de Nueva York - Buffalo, USA), Jacques Mercadier (UISBA - Pau, Francia), Noelia Fernández Díaz (NaCOM Energy - Agotnes, Noruega), Luis Alfonso Fernandez Serantes (Universidad FH JOANNEUM - Graz, Austria), Jose L Fernandez Solís (Texas A&M University - College Station, Texas, USA), María Cristina Rodríguez Rivero (University of Cambridge - Cambridge, UK), Nadia Rego Monteil (Queen's University - Ottawa, Canada), Raimundo Martínez Giménez (Euroconseil - Sevilla).

© 2017. 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(20170501)92:3<>1.0.TX;2-7
 CODEN: DYNAAU
 DOI: 10.6036/DYNAII

Tirada de este número: 3.867 (papel) y 38.918 (digital)

Ejemplares vendidos: 3.697 (papel) y 38.902 (digital)

UNIVERSIDADES COLABORADORAS

Universidad del País Vasco, Universidad de la Coruña, Universidad de Vigo, Universidad Carlos III, Universidad de Oviedo, Universidad de Navarra (Tecnun), Universidad Politécnica de Cartagena, Universidad Politécnica de Cataluña, Universidad de Mondragón, Universidad de Gerona, Universidad de Cantabria, Universidad Politécnica de Valencia, Universidad Miguel Hernández, 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 y Structuralia

DIRECCIÓN

José María Hernández Álava

Miembro de:

- Council of Science Editors
- Asociación Española de Comunicación Científica

Suscripción anual Institucional

España	200,00 €
Extranjero	243,00 €
Suscripción WEB ilimitada al archivo histórico.....	a consultar
Precio por ejemplar.....	35,00 €

Los ejemplares se envían por correo ordinario y su precio incluye los gastos de envío.
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 245x60 pixels (mín. 7 dd).....	15 €/día	
Banner web superior de 620x95 pixels (mín. 7 dd).....	50 €/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>
- 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 (Biblioteques Universitaries de Catalunya)**
<http://sumaris.cbuc.es>
- TECHNOLOGY RESEARCH DATABASE (ProQuest)**
<http://www.proquest.com>
- ULRICH'S PERIODICALS DIRECTORY (Grupo Elsevier)**
<http://ulrichsweb.com>

BOLETIN DE SUSCRIPCIÓN:

*Nombre y 2 apellidos..... Empresa

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

*CP *Población..... *Provincia

*Teléfono..... Móvil..... Fax

E-mail..... Web

Fecha Fecha Firma y Sello

FORMA DE PAGO SELECCIONADA:

Transferencia Cheque nominativo Domiciliación bancaria

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

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

Entidad
Agencia
D.C.
País
Oficina

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

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

CORREO POSTAL: Publicaciones DYNA SL Alda. Mazarredo 69 – 4º 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

Mayo - Junio 2017

293

ANALYSIS ON DIRECTIONAL FEATURE EXTRACTION FOR THE TARGET IDENTIFICATION OF SHALLOW SUBSURFACE BASED ON CURVELET TRANSFORM

ANÁLISIS DE EXTRACCIÓN DE FUNCIÓN DIRECCIONAL PARA LA IDENTIFICACION DE OBJETOS A BAJA PROFUNDIDAD EN EL SUBSUELO BASADO EN TRANSFORMADA CURVELET

308

RESPONSABILIDAD SOCIAL EMPRESARIAL EN LA INDUSTRIA MANUFACTURERA: ÁMBITOS SOCIAL Y ECONÓMICO

CORPORATE SOCIAL RESPONSIBILITY IN MANUFACTURING SECTOR: SOCIAL AND ECONOMIC DIMENSIONS

321

MODELO LOGIT ANIDADO PARA DETERMINAR LA EXPANSIÓN DE LOS VEHÍCULOS DE HIDRÓGENO (PILAS DE COMBUSTIBLE) EN ESPAÑA. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS PRINCIPALES ATRIBUTOS

NESTED LOGIC MODEL TO DETERMINE THE EXPANSION OF FUEL CELL ELECTRIC VEHICLES IN SPAIN. SENSITIVITY ANALYSIS OF THE KEY ATTRIBUTES

333

INFLUENCE OF THE IMPLEMENTATION OF THE EUROPEAN HIGHER EDUCATION AREA ON ENGINEERING AND ARCHITECTURE UNIVERSITY TEACHERS

INFLUENCIA DE LA IMPLANTACIÓN DEL ESPACIO EUROPEO DE EDUCACIÓN SUPERIOR EN EL PROFESORADO UNIVERSITARIO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

347

APLICACIÓN DE UN SISTEMA BUSINESS INTELLIGENCE EN UN CONTEXTO BIG DATA DE UNA EMPRESA INDUSTRIAL ALIMENTARIA

APPLICATION OF A BUSINESS INTELLIGENCE TOOL WITHIN THE CONTEXT OF BIG DATA IN A FOOD INDUSTRY COMPANY

300

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO ESPERADO DE FALLOS EN EQUIPOS COMPLEJOS. CASO APLICADO A UNA PLANTA DE TRITURACIÓN DE MINERAL DE COBRE

METHODOLOGICAL PROPOSAL FOR THE EVALUATION OF RELIABILITY IMPACTS IN COMPLEX SYSTEMS. APPLIED CASE TO A CRUSHING COPPER PLANT

314

MECHANICAL BEHAVIOR OF FULLY-GROUTED BOLT IN JOINTED ROCKS SUBJECTED TO DOUBLE SHEAR TESTS

COMPORTAMIENTO DE UN ANCLAJE TOTALMENTE EMBUTIDO EN ROCAS ADYACENTES, SOMETIDO A ENSAYOS DE DOBLE CORTADURA (CIZALLADO)

327

GUIADO DE VEHÍCULOS AUTÓNOMOS MEDIANTE LIDAR 3D SIGUIENDO UN ELEMENTO DE REFERENCIA

REFERENCE ELEMENT GUIDANCE OF AUTONOMOUS VEHICLES USING 3D LASER SCANNER

339

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AISLAMIENTO SÍSMICO DE APOYOS CONVENCIONALES DE NEOPRENO PARA PUENTES

EVALUATION OF THE SEISMIC ISOLATION CAPACITY OF CONVENTIONAL BRIDGE RUBBER BEARINGS

354

UN SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE OLORES EN LÍNEA PARA NARICES ELECTRÓNICAS

AN ONLINE ODOR CLASSIFICATION SYSTEM FOR ELECTRONIC NOSES

■■■ **nuestras cosas**

244
Hitos de la ingeniería industrial

245
Editorial

■■■■ **perspectivas**

246
Baterías: la clave para la electromovilidad

248
La energía nuclear en China: pasado, presente y futuro (2ª parte)

251
Metamateriales: actualidad y desarrollo

■■■■■ **notas técnicas**

254
Arquitectura de microservicios para reconocimiento De acordar requisitos a integrar cambios: claves para no fracasar en los proyectos de construcción

256
Arquitectura de microservicios para reconocimiento multi-dimensional de características utilizando un modelo de representación de conocimiento, basados en la percepción humana

258
Aplicación del análisis de regresión para el estudio de las pymes productivas españolas que obtienen informes motivados vinculantes de proyectos de I+D+i

260
¿Son más "verdes" las empresas lean?

261
Optimización de simulaciones en puertos marítimos

262
Entornos gráficos 3D avanzados para la representación del relieve cartográfico

■■■■■ **colaboraciones**

264
Evolución de las escaleras mecánicas: divergencia entre los diseños teórico y real

269
Arquitectura interactiva de modelado para educación y entretenimiento en museos

274
Gestión de las relaciones con el cliente (CRM) y BIG DATA: una aproximación conceptual y su influencia sobre el valor de los datos aplicados a la estrategia de venta

280
Evolución del sector eléctrico tras la Segunda Guerra Mundial

285
Laboratorio virtual de escenarios industriales para entrenamiento en las áreas de automatización y control

288
Realidad aumentada: aplicaciones en los negocios y la educación

LAS PRIMERAS LOCOMOTORAS DE VAPOR DE FABRICACIÓN ESPAÑOLA

Los viajes ferroviarios propiamente dichos con pasajeros se iniciaron en Inglaterra con los tramos Stockton-Darlington (1825) y Liverpool-Manchester (1830). Más de 20 años después se realizaron las inauguraciones de las históricas líneas españolas de Barcelona-Mataró (1848) y Madrid-Aranjuez (1851), todas ellas con locomotoras y la mayor parte del material fijo o rodante importado. Esta tónica prosiguió en muchas construcciones posteriores, reduciéndose progresivamente las importaciones en vía y vagones, pero no así en locomotoras, porque se tardaron otros 30 años más para abordar la fabricación del elemento tractor de los convoyes. Fue la **Maquinista Terrestre y Marítima** barcelonesa, que había sido fundada en 1855 y donde se construían máquinas de vapor para buques y talleres, la que dio los primeros pasos para situarse en el mundo de las locomotoras de vapor.

Cuando la línea del tranvía de Barcelona al Clot y Sant Andreu del Palomar decidió dotarse de locomotoras a vapor, las solicitó lógicamente a la Maquinista. No había sido este el primer encargo en la MTM, pues el Ferrocarril Económico de Villena a Alcoi lo había hecho en 1882, aunque a la Maquinista no le fue posible realizarlas. Pero sí lo hizo para el tranvía citado, entregándolas en los meses de junio y octubre de 1884.

Sin embargo no fue una de estas la primera locomotora a vapor de fabricación española que se probó. Una modesta empresa de Valencia, **La Primitiva Valenciana**, que se había creado como fundición en 1849, estaba elaborando un pedido de dos máquinas para el tranvía de Barcelona a Sant Joan d'Horta, y la primera de ellas se ensayó en marcha el 13 de mayo de 1884 en las vías del tranvía de tracción animal entre Silla y Cullera: por un mes se adelantó a la competencia catalana. Era entonces director y copropietario de La Primitiva, el joven ingeniero industrial Ramón Cases Civera, titulado por la Escuela de Barcelona en la promoción de 1879-1880, que había sustituido al anterior director técnico Julián López-Chávarri, impulsor inicial en la empresa de las técnicas del vapor.

A salvo de este curioso suceso, la continuidad en la fabricación de locomotoras de vapor, ya con destino a líneas de larga distancia, se hizo permanente en la MTM. En 1888 entregó las dos primeras máquinas de ancho de vía español para la línea Barcelona-Sarriá, y durante muchos años posteriores se convirtió en proveedora sobre todo de MZA (Ferrocarriles de Madrid a Zaragoza y Alicante), con modelos como el del primer encargo serio, el llamado tipo 0-4-0, del año 1900, hasta las famosas locomotoras Montaña, del tipo 2-4-1, construidas a partir de 1925, una de las más robustas y adaptables al complejo trazado español.

Por su parte, los Ferrocarriles del Norte intentaron en 1917 llegar a un acuerdo con MZA y la MTM para la adquisición de locomotoras a menores costos. La diferencia de características que pedían ambas compañías impidió el acuerdo y el Norte impulsó la creación en 1918 de la Sociedad Española de Construcciones Babcock & Wilcox en Vizcaya para fabricar sus máquinas, que se inició con un prototipo 2-4-0 en 1921, punto de partida de la que sería llamada Mastodonte.

El 23 de junio de 1975 se apagó la última locomotora de vapor en servicio comercial en las líneas españolas, una Mikado de diseño norteamericano que en España construyeron Macosa, MTM, B&W y Euskalduna. Pero la última fabricada de ancho español fue una Garrat de B&W, entregada el 18 de abril de 1961 a RENFE.



Locomotora de la Maquinista Terrestre y Marítima para el tranvía de Barcelona al Clot y Sant Andreu del Palomar



Locomotora Montaña



Locomotora Mastodonte

ROL INTEGRADOR DEL INGENIERO INDUSTRIAL

En las últimas décadas, particularmente a partir de los 1990, se puso de moda argumentar que el sector industrial ya no tenía la misma importancia que antes porque habíamos entrado en la era de la sociedad post-industrial.

Sin embargo, el sector industrial ha sido siempre el núcleo duro del sistema económico. Muchas de las invenciones tecnológicas y organizativas del mismo han sido transferidas a otros sectores, como el de servicios, para aumentar productividades. El desarrollo del estado del bienestar se ha alcanzado, en la inmensa mayoría de los casos a través de la industrialización y la manufactura.

La aparición de Internet y el surgimiento del concepto de la "economía del conocimiento" contribuyeron a ello. Se argumenta que se podría prescindir de la industrialización, olvidando que también es conocimiento, y enriquecerse prestando servicios.

Es ingenuo pensar que hemos entrado en una nueva era de la "economía del conocimiento". La historia muestra que siempre hemos vivido en una economía del conocimiento. La calidad del conocimiento, a través de la tecnología y las mejoras en la capacidad de organización productiva, fue la que enriqueció a los países más industrializados. Solo habría mirar la historia de la humanidad y repasar las tres revoluciones industriales anteriores.

La crisis de 2008 obligó a reconocer que la fe puesta en los servicios como nuevo motor del crecimiento había sido como menos exagerada. Además, muchos de estos servicios de "alta productividad" como ingeniería, diseño y consultoría en materia de gestión, tienen como fundamento la externalización de los servicios a empresas industriales.

Los países que mejor han resistido la crisis y los que están saliendo antes de la misma son los países más industrializados.

Es un hecho que las economías industrializadas son las que mejor soportan las crisis y hay evidencia de que el progreso y el desarrollo económico y social vienen determinados por la avances tecnológicos y capacidad organizativa aplicadas desde la industria. La expansión de la digitalización, la evolución de las tecnologías ya existentes y la necesidad de afrontar el reto manufacturero de los países en vías de desarrollo, no para producir como ellos, sino para superarles en tecnología, capacidades organizativas y competitividad, nos ha llevado a lo que se viene llamando la Industria 4.0, en la que se incorporan medios como la robótica colaborativa, la fabricación aditiva o la conectividad global.

La evolución y los cambios en la economía global, los avances tecnológicos y el desarrollo de nuevos instrumentos en ayuda de la capacidad organizativa, no son ajenos al Ingeniero Industrial, elemento clave en todos estos avances a través de la historia.

Desde su formación amplia, versátil y polivalente, está en unas condiciones únicas para desarrollar una magnífica y necesaria labor en estos desafiantes procesos.

Asimismo, el Ingeniero Industrial debe ser un referente en el establecimiento y aplicación de valores en la empresa. La ética, la prevención y seguridad laboral, el respeto por el medio ambiente y por las personas, son premisas ineludibles en lo que hoy llamamos Responsabilidad Social Corporativa.

Su habilidad para entender y aplicar, no solo conocimientos científico-técnicos, sino una cierta maestría económica son claves en la actualidad. Ninguna empresa puede subsistir sin la necesaria salud económica.

El Ingeniero Industrial tiene la potestad de elegir entre un camino de gestión puramente profesional, en una especialidad concreta, debido a sus amplios conocimientos científico-técnicos. También puede decidir aspirar a un rol de líder empresarial o socio-económico, con lo cual en este proceso de mejora continua puede adquirir conocimientos y experiencias adicionales.

Son importantes, en este aspecto, la formación en habilidades digitales, trabajo en entornos de máxima colaboración que fomenten la creatividad/innovación, cambio y mejora continua; también ser un participante activo en la transformación cultural de la empresa, así como en la adquisición y práctica de conocimientos de inteligencia emocional.

A pesar de la crisis y sus consecuencias, las oportunidades para el Ingeniero Industrial y su rol integrador siguen siendo ilusionantes y seguro que fructíferas para la sociedad.

editorial

Baterías: la clave para la electromovilidad

Batteries: the key to electromobility

Las baterías son un reto importante para la investigación actual. Especialistas del Instituto Fraunhofer trabajan en nuevas tecnologías para diseñar baterías *made in Germany*.

Monika Weiner
(FRAUNHOFER)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8212>

¿Movilidad sin contaminar el medio ambiente? Los coches eléctricos hacen que sea posible. Son silenciosos, no producen gases de efecto invernadero y no consumen – cuando se alimentan con energía eléctrica a partir de fuentes renovables – combustibles fósiles. Una conversión en todo el mundo y de todos los vehículos a motor eléctrico, por tanto, no sólo llevaría aire limpio a la humanidad, sino que también ayudaría a detener el cambio climático y protegería las reservas de petróleo y gas. Suena fantástico. ¿Pero es un cambio completo factible en su totalidad? Y si es así, ¿cuánto tiempo tardaría en lograrse?

Los investigadores del Instituto Fraunhofer de Sistemas de Investigación e Innovación (ISI) en Karlsruhe han abordado el principio básico de esas cuestiones. Conclusión: Una movilidad electrificada global sería capaz de lograrse e incluso relativamente pronto. Entre 2030 y 2050 una conversión completa podría tener éxito en coches dotados de motores eléctricos. Pero con una condición esencial: nuevos sistemas de almacenamiento de energía, potentes y económicos. Debe aumentarse la densidad energética de las baterías y por lo tanto el alcance de los vehículos, así como reducir los tiempos de recarga. El análisis muestra que con las baterías de ion-litio actualmente empleadas se puede alcanzar este objetivo sólo si la tecnología hace avances significativos. Paralelamente Fraunhofer con otros entes asociados comprueba si tecnologías alternativas, como baterías litio-azufre o de componentes sólidos estarán disponibles a gran escala en un futuro próximo.

Por el momento, sin embargo, no hay alternativa más allá de las baterías de ion-litio, y está claro que deben ser mucho más potentes. El tiempo apremia: para el año 2020, de acuerdo con lo expresado por el Gobierno Federal deben circular por las carreteras alemanas un millón de

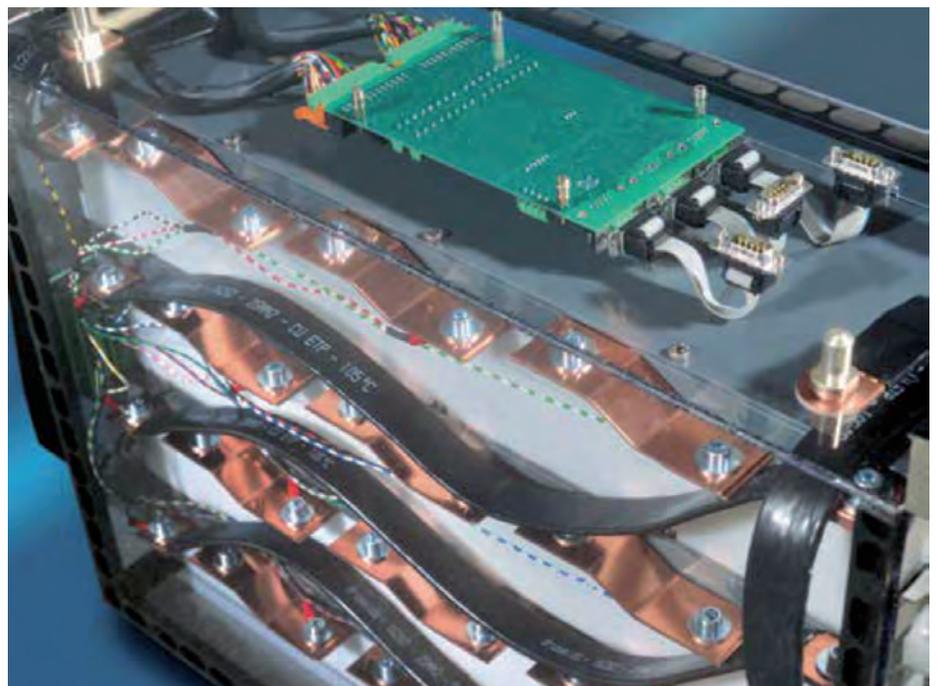
coches con motores eléctricos. *“La calidad de las baterías determina el éxito de la movilidad eléctrica. Este es un gran desafío para la investigación”,* explica el Dr. Kai-Christian Möller, portavoz adjunto de Fraunhofer-Allianz Batterien.

De producción en masa a un producto de calidad

Las baterías de ion-litio son todavía productos baratos, producidas en serie. Miles de millones de ellas se fabrican en Japón, Corea o China y se instalan principalmente en los teléfonos móviles, ordenadores portátiles y tabletas. No hay baterías de ion-litio fabricadas en Alemania, pues el país no es competitivo. Hasta ahora, al menos. Pero eso puede cambiar – gracias a la creciente demanda de baterías de alta calidad para los coches eléctricos. Representantes de los principales fabricantes alemanes de automóviles, proveedores e institutos de investigación están cooperando en la “Plataforma Nacional para la Movilidad Eléctrica”, pues está prevista en la próxima década, una duplicación de la necesidad de dispositivos de almacenamiento de energía para

vehículos eléctricos. Un país como Alemania, donde se encuentran muchos fabricantes de maquinaria y equipos, así como excelentes instalaciones de investigación, tiene una ventana de oportunidad para asegurarse una participación de mercado.

Pero, ¿cómo hacerse proveedores económicos ante la competencia del Lejano Oriente? Los miembros de la “Plataforma Nacional para la Movilidad Eléctrica”, que incluyen el Instituto Fraunhofer han desarrollado un plan de trabajo: en primer lugar, la industria debe iniciar un nuevo intento para promover la producción de células en Alemania. En el año 2020, cuando aumente la demanda de coches eléctricos de la próxima generación con baterías potentes, de gran alcance y recarga rápida, debería estar lista para entrar en ese mercado. Con objeto de crear las condiciones técnicas para afrontar la carrera, los investigadores de Fraunhofer analizan cada diferente etapa de producción, desde la célula unitaria hasta el módulo terminado, y desarrollan nuevas soluciones que hagan al fabricante más rápido, económico y utilizando menos recursos. *“No es una tarea fácil, ya que hay más de*



Con el proceso de soldadura láser por modulación de energía, Fraunhofer-ILT ha desarrollado un proceso de fabricación en serie de packs de batería

un centenar de diferentes parámetros que afectan a la durabilidad y el rendimiento”, afirma Möller.

Por ejemplo, la fabricación de electrodos: las películas conductoras se producen a gran escala. El cobre muy fino o el papel de aluminio circula a entre 20 y 50 metros por minuto, primero por un sistema de revestimiento y luego a través de una cámara de secado, en la que el solvente se evapora. Solo en esta operación pequeños detalles – como la velocidad de la cinta transportadora o la distribución de temperatura en la cámara de secado – son decisivos para la calidad de la capa, del electrodo terminado y finalmente de la batería. En un proyecto de investigación, expertos del Instituto Fraunhofer de Tecnología Láser (ILT) y el Instituto Fraunhofer para Tecnologías de Cerámica y Sistemas

(IKTS), han investigado cómo se puede optimizar el proceso de secado: en lugar de enviar la película revestida a través de hornos calientes, los ingenieros utilizan diodos y láseres de fibra eficientes. Con ello se consigue el proceso de secado con casi la mitad de la energía requerida para el horno continuo. También el corte de los electrodos puede ser acelerado significativamente. Los investigadores del Instituto Fraunhofer para la Técnica de Materiales y Radiaciones (IWS) han desarrollado un método que puede integrarse directamente en el proceso de fabricación: una vez que la película revestida sale de la cámara de secado, un láser sin contacto la corta a las dimensiones deseadas del electrodo.

Esto se puede hacer a tal velocidad que incluso para tiempos de procesado en grandes formatos de célula basta con me-

nos de un segundo por corte – y eso con la cinta transportadora en marcha. Los cortes con láser no tienen ningún tipo de desgaste de herramienta y han logrado en cada electrodo individual una excelente calidad de los bordes.

En el siguiente paso del proceso, se unen capas de electrodos y se suelda su contacto de corriente. El paquete completo se envasa luego junto con el electrolito líquido en sobres y se sella. Las células terminadas pueden ahora formar, soldadas conjuntamente pequeños módulos o grandes packs. Las conexiones deben ser muy estables, pues cuando las baterías se van a utilizar en los coches eléctricos, a veces son sacudidas por circular en todo tipo de terreno. Los ingenieros del Instituto Fraunhofer de Tecnología Láser ILT pueden unir los contactos de cobre con láser de bajo consumo de energía. Esto asegura una alta calidad de los contactos, ahorro de tiempo y calidad de las baterías, ya que no se calientan las células que son sensibles al calor.

Y para que la batería acabada tenga un rendimiento óptimo, las células necesitan un seguimiento y control electrónico. Un sencillo y ágil sistema de gestión de baterías, desarrollado por expertos del Instituto Fraunhofer de Sistemas Integrados y Tecnología de Dispositivos (IISB) en un proyecto europeo, se asegura de que todas las células carguen siempre de manera óptima y que las tensiones ni se excedan ni sean inferiores. Además, el sistema de gestión cuando una célula es algo más débil evita el sobrecalentamiento y favorece el equilibrio. «Las diversas actividades de investigación del Instituto proporcionan la base para una producción de alta calidad de las baterías de ion-litio, necesaria para la industria en las próximas décadas», afirma Möller.



Fabricación de electrodos según la técnica de capas de Fraunhofer-ISIT

La energía nuclear en China: pasado, presente y futuro (2ª parte)

Nuclear energy in China: past, present and future (2nd part)

Gonzalo Jiménez¹ y César Queral²

¹ UPM. ETSI Industriales (España)

² UPM. ETSI Minas y Energía (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8277>

5. REACTORES MODULARES Y DE GENERACIÓN IV

China ha sido uno de los países que más fuerte ha apostado por los diseños de Generación IV. El primer modelo que puso en marcha fue el reactor rápido experimental refrigerado por sodio de 20 MWe, *China Experimental Fast Reactor* (CEFR), de la tecnología rusa BN-20, construido por OKBM Afrinkantov junto con Hidro-press (Rusia).

Está operado por el *China Institute of Atomic Energy* (CIAE) que lo hizo en 2011. Además de la construcción del reactor, China ha desarrollado la capacidad de fabricar los elementos combustibles para reactores rápidos, bastante diferentes a los de reactores convencionales.

Los elementos combustibles de los reactores rápidos refrigerados por sodio, como el CEFR, son hexagonales, similares geoméricamente a los elementos de los reactores PWR rusos denominados VVER. Estos elementos tienen una camisa individual que los independiza hidráulicamen-

te, de forma similar a la existente en los reactores BWR y algunos PWR de diseño ruso VVER-440. En la parte inferior y superior de dichos elementos combustibles hay regiones donde no se incluye combustible nuclear, y que sirven como blindaje neutrónico (parte superior) y como distribuidor del flujo hidráulico (parte inferior).

El combustible de este reactor en la primera carga fue de óxido de uranio enriquecido al 64% y para posteriores recargas de óxidos mixtos de uranio y plutonio (MOX) con un enriquecimiento cercano al 20%, muy superior en ambos casos al enriquecimiento máximo del 5% de los combustibles PWR/BWR. En general, dentro de los núcleos de reactores rápidos es posible colocar elementos combustibles que tengan como misión primordial producir Pu-239 a partir del U-238, consiguiendo que el ciclo total de operación se pueda llegar a producir más Pu-239 del que se consume. Debido a esa característica, a los reactores rápidos también se les llama reproductores.

Dada la experiencia satisfactoria en la construcción y operación de este reactor experimental, China quiere construir un reactor rápido chino de 600 MWe (CFR600) a partir de 2017, que estuviese en operación en 2023 [21]. En una segunda fase, se construiría un reactor de

1000 MWe, operativo en 2030. También se consideró la posibilidad de construir un reactor BN800 ruso, pero finalmente el proyecto no prosperó.

En el terreno de los reactores modulares de alta temperatura, China ha tomado la delantera a nivel internacional al tener en construcción un reactor demostrador de la tecnología de 200 MWe, el *High-Temperature Gas-Cooled Reactor Pebble-Bed Module* (HTR-PM) [22] (Fig. 1).

El reactor HTR-PM es de lecho de bolas, tecnología desarrollada en Alemania en los '80, reflatada por Suráfrica en los 2000 y abandonada posteriormente hasta que China ha tomado el relevo. En este tipo de reactores, el combustible nuclear consiste en micro-esferas de 0.5-0.7 mm de diámetro, en las que el uranio enriquecido está cubierto por una matriz de grafito. Las micro-esferas se agrupan en esferas con un diámetro de 6 cm que circulan a lo largo de la vasija durante la operación del reactor. Una característica importante de estos reactores es su incapacidad de sufrir un accidente severo por diseño, ya que la disposición de las esferas es suficiente para que el combustible se refrigere por radiación y convección natural en caso de accidente. Esta prevista la posibilidad de construir hasta un total de 18 unidades más en el mismo emplazamiento

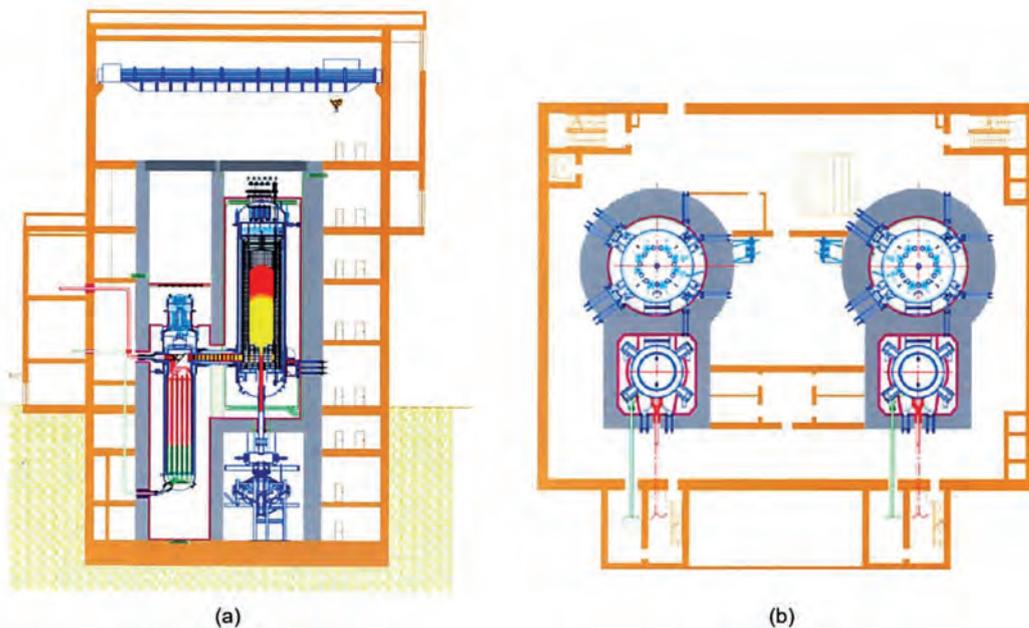


Fig. 1: Reactor demostrador de Generación IV HTR-PM. (a) Vista frontal (b) Vista superior. Fuente [22]

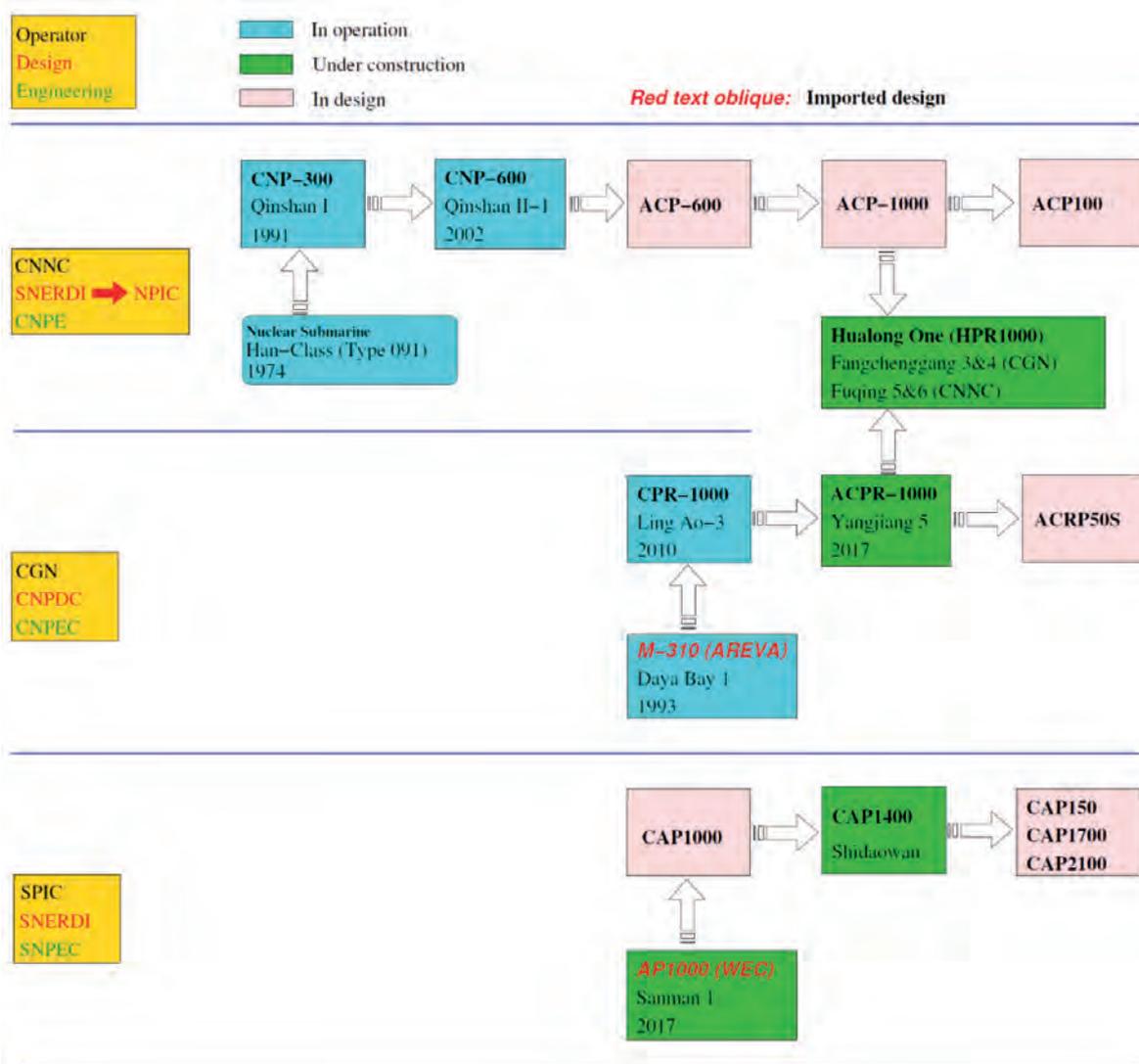


Fig. 2: Evolución de los principales diseños de agua ligera de reactores chinos. Fuente: Elaboración propia

para posteriormente construirlo en otros emplazamientos y venderlo a otros países.

Por otra parte hay tres desarrollos de reactor modular de agua ligera en marcha (Fig. 2).

- CNCC ha desarrollado un reactor modular basado en el diseño ACP600, el diseño ACP100 para su uso para desalinización de agua, cuyo primer proyecto se espera realizar en Putian. Este diseño ya ha pasado la revisión de seguridad de la Agencia Internacional de la Energía Atómica.
- CGN está desarrollando el diseño ACRP50S que corresponde a un pequeño reactor nuclear flotante para su uso en lugares apartados y emplazamientos en el mar, como el caso de las plataformas petrolíferas. Este proyecto ya ha sido aprobado y se espera que su construcción comience en 2017 y que este operativo en 2020.
- SPIC está desarrollando su propio diseño modular, el CAP150, pero

todavía está en una fase inicial de diseño.

Finalmente, con respecto a los modelos de reactor subcrítico guiados por acelerador (ADS), China se ha lanzado al desarrollo de un modelo experimental propio de 10 MWth llamado CLEAR-I (Fig. 3). Siguiendo una estrategia pareja a los reactores de sodio, su plan es construir primero el reactor experimental, luego un demostrador de 100 MWth y finalmente un reactor de escala comercial de 1000 MWth [23].

6. PARTICIPACIÓN DE LA INDUSTRIA NUCLEAR ESPAÑOLA EN LOS PROYECTOS CHINOS

La industria nuclear española muestra un gran interés por su participación en los proyectos chinos, creando en el año 2006 una alianza empresarial para el desarrollo comercial de la industria en China, llamado SNGC (*Spanish Nuclear Group for Cooperation*), al cual pertenecen Tecnatom, Enusa Industrias Avanzadas, Ringo Válvulas y ENSA [24].

La empresa española Tecnatom se ha volcado en la participación en los nuevos reactores de China, estableciendo una filial en China (Tecnatom China) y creando una *joint venture* con CGN, llamada CITEC. Además, en los últimos años Tecnatom ha formado junto con WEC a los operadores de AP1000 chinos y ha participado activamente en los diseños de las salas de control de diversas centrales CPR1000 (Fuqing 1-4, Fangjiashan 1-2), CNP600 (Changjiang 1-2) y ACRP1000 (Yangjiang 5-6), donde las principales tareas realizadas han sido [25]:

- Análisis de la Ingeniería de Factores Humanos de las salas de control (principal, panel de parada remota y auxiliar).
- Especificación y análisis de la interfaz hombre-máquina en lo relacionado con la operación de las centrales.
- Realización de las pantallas de operación que cubren: operación normal y de fallos; operación en emergencias, pantallas de alto nivel

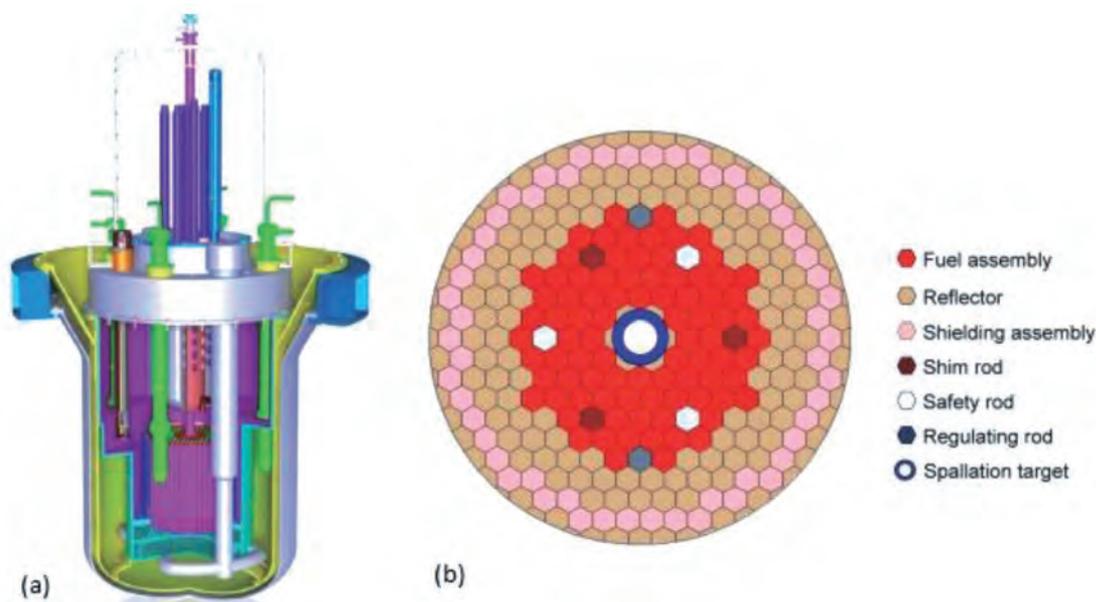


Fig. 3. Reactor de Generación IV CLEAR-I. (a) Vista 3D del reactor (b) Configuración del núcleo en modo crítico. Fuente: [23]

para apoyo a los procedimientos de operación y mantenimiento; pantallas de alto nivel y gran tamaño para el conocimiento del estado de la planta.

- Implementación de las pantallas de operación en el sistema de control distribuido.
- Ingeniería de alarmas (filtrado y computarización).
- Computarización de los procedimientos de operación.
- Diseño de la sala de control.
- Dedicación y cualificación de los instrumentos comprados como clase comercial.
- Cualificación de los paneles de la sala de control y sala de emergencia.
- Fabricación, ensamblaje, pruebas e instalación en el emplazamiento definitivo.

Junto con Enusa, Tecnatom también ha suministrado equipos de inspección de soldaduras para combustible nuevo para la fábrica china de Yibin, en Sichuan, filial de CNNC [26].

Recientemente, en marzo de 2016, Enusa y Tecnatom han firmado un acuerdo con el Suzhou Nuclear Power Research Institute (SNPI), perteneciente a CGN. Bajo este acuerdo, las tres empresas se comprometen a colaborar en el ámbito de los equipos de inspección de combustible [27].

En el caso de Westinghouse Electric Spain, la empresa se ha involucrado muy activamente en los proyectos de construcción de los AP1000 chinos. Concretamente, han participado en la construcción del

edificio de contención y del edificio auxiliar del Sanmen, con casi 100 ingenieros trabajando en sus oficinas de Madrid para el proyecto [28].

Con respecto a ENSA, la empresa española lleva presente en China desde 1995, habiendo suministrado su primer equipo en 1999. Desde entonces ha suministrado siete generadores de vapor para las centrales nucleares de Qinshan, Changjiang y Sanmen II, contenedores y bastidores para almacenamiento de elementos combustibles en las centrales nucleares de Daya Bay y Ling Ao e intercambiadores de calor y tanques de ácido bórico para Taishan [29]. ENSA ha desarrollado durante los últimos años el contenedor ENUN 24P, tras un acuerdo en 2014 con CGNPC Uranium Resources [30].

Finalmente, también cabe destacar que el organismo regulador español (Consejo de Seguridad Nuclear - CSN) ha participado junto con Tecnatom en un proyecto de colaboración con el organismo regulador chino, National Nuclear Safety Administration (NNSA), para la formación de personal de NNSA. Este proyecto tendrá continuidad en una segunda fase, que acaba de ser adjudicada al consorcio internacional en el que participan Tecnatom y el CSN.

PARA SABER MÁS

- GONZALEZ-JIMENEZ, Antonio. NUCLEAR POWER PLANTS: A HISTORICAL VISION - 1ST PART. DYNA, Marzo 2014, vol. 89, no. 2, p.138-143. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5757>
- GONZALEZ-JIMENEZ, Antonio. NUCLEAR POWER PLANTS: A HISTORICAL VISION - 2ND PART. DYNA, Mayo 2014, vol. 89, no. 3, p.267-

271. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5759>

- Zhou Ping. "Nuclear power development in China" IAEA Bulletin, 2/1987.
- Xu Yi-chong et al. "Nuclear Energy Development in Asia. Problems and Prospects" Editorial Palgrave McMillan, 2011.
- World Nuclear Association. "France Nuclear Power" 10/11/2016
- Carmelo Palacios. "The Spanish Nuclear Group for Cooperation: A Story of Success". Nuclear España, septiembre de 2013, pg 21-25.
- Luis Rejas y Víctor Martínez. "Diseño y suministro de salas de control para el programa nuclear de China" Nuclear España, Febrero 2016, pg. 40-45.
- Teresa Alejos. "ENSA y ENUSA logran nuevos acuerdos comerciales en China" Revista SEPI, 27/10/2014, pg. 28-30.

AGRADECIMIENTOS

El grupo investigador de Ciencia y Tecnología de Sistemas Avanzados de Fisión Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) desea agradecer el apoyo para el proyecto Prevención y gestión de secuencias de Accidente severo en reactores avanzados y convencionales (PYGAS): ENE2015-67638-R (MINECO/FEDER).

MATERIAL SUPLEMENTARIO

Las referencia completas y tablas 1, 2 y 3 se pueden descargar en: http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/8247-1.pdf



Metamateriales: actualidad y desarrollo

Metamaterials: current and development

Hector Torres-Silva
Universidad de Tarapacá (Chile)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8244>

1. INTRODUCCIÓN

En relación a los campos electromagnéticos, la propagación como ondas en diferentes medios y su topología ha sido una preocupación permanente del hombre desde los tiempos de J. Maxwell (1865), quién sentó las bases teóricas del electromagnetismo. A. Einstein en 1905 con su trabajo sobre la *Relatividad Especial* le otorgó el espaldarazo definitivo a la teoría de Maxwell. En los años 60, dos trabajos teóricos sobre electromagnetismo (V. Veselago sobre Metamateriales y D. Lipkin sobre *campos Zilch* y su *quiralidad*), permanecieron olvidados por cerca de 40 a 50 años en algunas bibliotecas, sin ningún interés en los círculos académicos y de investigación. Estos temas que aún no aparecen en los textos de electromagnetismo comienzan a adquirir vigencia entre los años 2005-2010. Actualmente, hay una gran actividad académica y tecnológica sobre la aplicación de dichas ondas en tecnologías de punta principalmente en el sector de las telecomunicaciones. Estos temas, a pesar de estar muy relacionados (metamateriales y campos zilch), por razones de espacio en esta oportunidad nos ocuparemos solamente de los metamateriales, su presente y futuro en cuanto a sus proyecciones y aplicaciones centrando nos en el tema de la invisibilidad de objetos.

Metamaterial es un material diseñado por el hombre, construido de unidades más grandes que los átomos o moléculas, a escala nanométrica cuyo estado y comportamiento está determinado por las características geométricas de las unidades y no por la composición química. Estos materiales artificiales electromagnéticos están desempeñando un papel fundamental en muchas aplicaciones como en la fabricación de capas de invisibilidad en microondas y óptica hasta mejoras sustanciales en la microscopía para el desarrollo de componentes electrónicos. En el futuro, la investigación de estos metamateriales planea crear estructuras cada vez más reducidas en tamaño, en un rango frecuencia cada vez mayor aplicando el principio de refracción negativa que

es el fundamento base para este tipo de materiales. El índice de refracción es un fenómeno electromagnético que se produce en la superficie (o interfaz) entre dos materiales. La *ley de Snell* establece que la relación entre el ángulo de incidencia radiada y el ángulo de transmisión refractado resultante se basa en el índice de refracción n de los materiales dado por $n = \pm\sqrt{\mu\epsilon}$. Por lo tanto, puede verse que el comportamiento del índice de refracción depende de los valores de los parámetros μ que es la *permeabilidad magnética* y ϵ la *permitividad eléctrica*, manipulando así a voluntad el índice de refracción.

La creación de estos de materiales artificiales genera muchas posibilidades de aplicaciones, desde microscopios hasta artefactos militares camuflados. Para que esas propiedades funcionen a frecuencias de microondas y de óptica, los componentes de un metamaterial deben ser más pequeños que la longitud de onda de la radiación electromagnética con la que interactúa. De esta manera el campo electromagnético considera al sistema como homogéneo. Los primeros pasos que se dieron en la fabricación de un metamaterial consistía en la formación de estructuras apiladas de capas en forma de circuitos de materiales conductores y no conductores en parejas alternadas.

2. ÍNDICE NEGATIVO DE REFRACCIÓN

El índice de refracción es una medida de cuánto se doblan las ondas electromagnéticas al pasar de un medio a otro. Una forma común de explicar este fenómeno de refracción negativa es considerando el caso que todos conocemos; cuando uno introduce por ejemplo un lápiz en un vaso de agua, se tiene la ilusión óptica de que el lápiz se quiebra pero en la misma dirección en que se introdujo. Esto se debe al índice positivo de la refracción

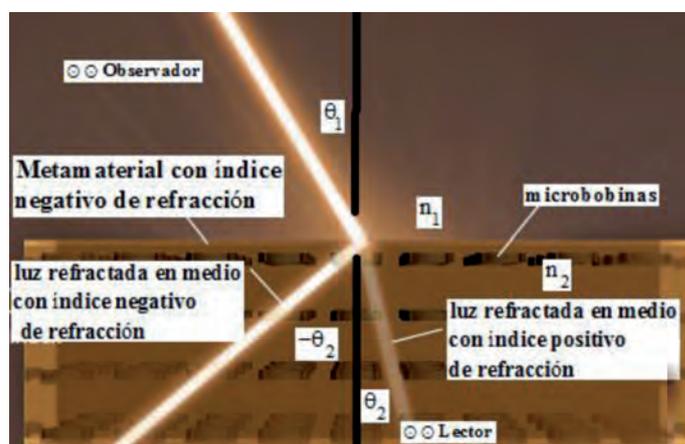


Figura 1: Refracción de metamaterial (De dominio público)

del agua, ($n=1,33$), por el contrario, en el caso de que fuera un metamaterial líquido, en el que el índice de refracción es negativo nos daría la impresión de que el lápiz se quiebra hacia el lado contrario. Este fenómeno a nivel óptico se rige por la conocida ley de Snell que funciona como sigue (Figura 1): Si n_1 es positivo y n_2 tuviese un valor positivo, es válida la ecuación $n_1 \text{seno}\theta_1 = n_2 \text{seno}\theta_2$, (la trayectoria del rayo es en café claro a la derecha del lector y el observador vería al lector). Si n_2 es negativo, la ley de Snell es $n_1 \text{seno}\theta_1 = n_2 \text{seno}(-\theta_2)$, (trayectoria del rayo es en color más brillante y el lector ubicado a la derecha abajo no sería detectado por el observador ubicado a la izquierda, parte superior).

Esta posibilidad de invisibilidad a frecuencias ópticas, en 2015 ha sido demostrada por X. Zhang, del *Laboratorio de Ciencias de los Materiales de Berkeley*, utilizando nanoantenas de oro y construyendo un manto de apenas 80 nanómetros de espesor con el que se envuelve un objeto tridimensional del tamaño de unas pocas células biológicas que ha sido modelado de forma irregular. La superficie de la capa ha sido diseñada para desviar las ondas de luz reflejadas de manera que el objeto se vuelve invisible para la detección óptica. La matemática involucrada en este fenómeno escapa al contenido de este artículo, diciendo solamente que se basa en las transformaciones ópticas que son necesarias al pasar de tres a dos dimensiones. Esta técnica permite que la onda vea un metamaterial plano.

La capa ultradelgada es potencialmente escalable para ocultar objetos ma-

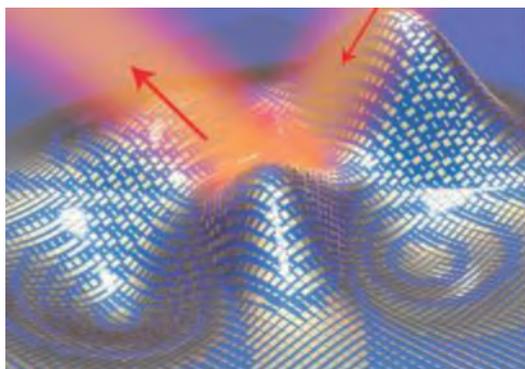


Figura 2a

Figura 2a: Credito: Xiang Zhang group, Berkeley Lab. Figura 2b: Las antenas de la capa de oro 2015 compensan la distorsión, ocultando el objeto

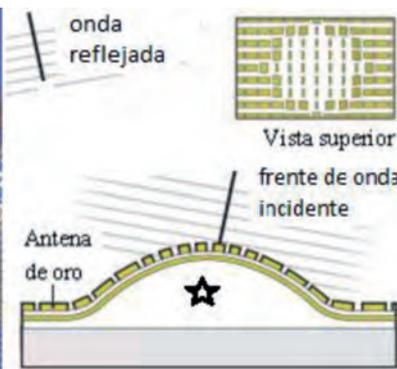


Figura 2b

croscópicos. La dispersión de la luz (ya sea visible, infrarroja, rayos X, etc.), a partir de su interacción con la materia, es la que permite detectar y observar los objetos con propiedades ópticas que se derivan de su estructura física en vez de su composición química, Figura 2a. En la Figura 2b, se muestra esquemáticamente la compensación de fase de los frentes de onda. La vista superior de esta figura muestra el ocultamiento del objeto.

Sin embargo el desafío mayor de esta tecnología está en lograr un ancho de banda razonable para cubrir el espectro óptico, ya que de lo contrario la invisibilidad no sería completa.

La tecnología para la invisibilidad a frecuencias de microondas y de radar está actualmente más desarrollada y disponible. Este fenómeno se hace evidente en experimentos a frecuencia de microondas del orden de 10GHz, como se muestra en la Figura 3a y 3b. Basado en las ideas de J. Pendry y D. Smith, donde una multicapa hecha de pequeñas estructuras de metamaterial y de cobre, que en base a la ley de Snell descrita más arriba permite tornar invisible un cuerpo sólido. Estos metamateriales estructurados permiten un nuevo paradigma de diseño electromagnético, ahora denominado teoría de transforma-

ción óptica. En las Figuras 3a y 3b se aprecia como un cuerpo metálico no refleja las ondas y por lo tanto es indetectable.

Sin embargo se han encontrado limitaciones a la invisibilidad de objetos. La actual teoría confirma que es posible usar capas para ocultar perfectamente un objeto para una longitud de onda específica, pero ocultar un objeto de una iluminación que contiene diferentes longitudes de onda se vuelve más difícil a medida que aumenta el tamaño del objeto. No obstante, con nuevos conceptos y diseños, como metamateriales activos y no lineales, es posible avanzar en la búsqueda de la transparencia total y la invisibilidad de objetos macroscópicos. El ancho de banda y el tamaño del encubrimiento es importante para evaluar el potencial de disimular dispositivos para aplicaciones del mundo real, como antenas de comunicación, dispositivos biomédicos y radares militares.

3. ACTUALES APLICACIONES DE LOS METAMATERIALES

Las aplicaciones que son el resultado de las propiedades de los metamateriales pueden ser muy diversas. Aparte de lo discutido en este artículo que es el problema

de la invisibilidad, con los metamateriales como subsistemas se encuentran actualmente diversas aplicaciones: las lentes corrientes tiene un índice de refracción positivo por lo cual son curvos, como en el caso de los telescopios o de los microscopios. Los metamateriales brindan la posibilidad de que estas lentes sean planas y puedan mejorar en un grado importante su eficacia como super-lentes. A nivel de microondas, teniendo en cuenta que es más fácil manejar longitudes de onda grandes, una de las propiedad que más interés genera es su uso en asuntos de seguridad nacional, puesto que también se puede presentar como una capa de invisibilidad para emisión de radio y por tanto imperceptible para los radares. Los metamateriales también son usados en diferentes sectores, tales como la Óptica, la Nanotecnología y muy especialmente en las Telecomunicaciones, en la fabricación de diversas antenas y dispositivos asociados:

- Antenas pequeñas de móviles o de satélites en los que se quieren agrupar un gran número de antenas en un espacio mínimo.
- El uso en filtros de microondas confinando la señal mediante la utilización de líneas de transmisión.
- Diseño de líneas de transmisión, atenuadores, acopladores, desfases, sensores, guías de ondas curvadas y circuitos híbridos.
- Empleo de metamateriales como antenas "leaky-wave" en un determinado rango de frecuencias, donde proporcionan un barrido completo de haz, estructuras planas como son las antenas de microcinta con metamateriales que no solo aumentan la banda de trabajo sino que también logran polarización horizontal.
- Capa de invisibilidad para emisión de radio y por tanto imperceptible para los radares.

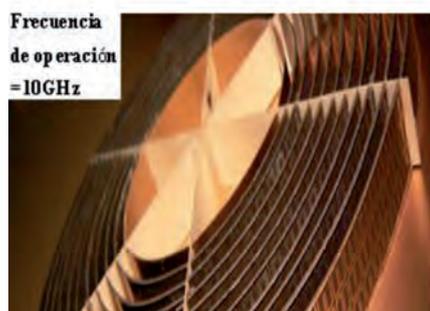


Figura 3a

Figura 3a. Metamaterial invisible en microondas. Figura 3b. Invisibilidad a frecuencia de microondas. Cortesía de D. Shuring y Adaptada de D. R. Smith

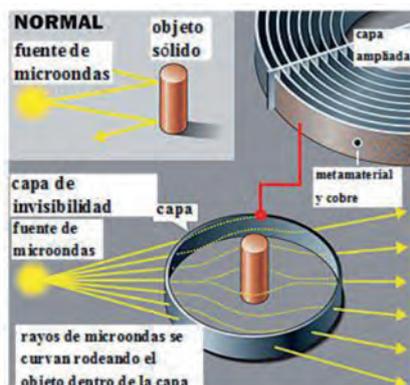


Figura 3b

4. APLICACIONES FUTURAS DE LOS METAMATERIALES

- Mediante la manipulación de sus microestructuras internas, pueden exhibir propiedades que de otro modo no se encuentran en un material de origen natural. Esto posibilita la elaboración de piezas o estructuras por impresión 3-D.
- Podrán mejorar la eficiencia de las células solares, en un avance que podría llevar a cabo nuevas células solares que utilicen mejor la luz so-

lar, se han diseñado unos materiales con la capacidad de doblar la luz visible en ángulos inusuales pero precisos. Estas nanoestructuras son capaces de conseguir una fuerte interacción con el campo magnético de la radiación de infrarrojos que le incide, y con ello generar una gran concentración de campo magnético entre las nano estructuras fabricadas, que no es posible con medios naturales.

- Permitirán lograr un mayor desarrollo de un tipo de superlentes planas que operen en la parte visible del espectro. Tales lentes ofrecerían una resolución superior a la que ofrecen las de tecnología convencional, capturando detalles mucho más pequeños que una longitud de onda de luz, y mejorarían inmensamente las aplicaciones en biomedicina. Permitirían ver el interior de una célula humana o diagnosticar una enfermedad en un feto dentro del útero materno.
- Nuevos metamateriales revolucionarán el campo de la óptica. Permitirán el desarrollo de microscopios ultrapotentes, además de importantes avances en computación cuántica y paneles solares.
- Desarrollo de sistema capaz de transferir con mucha eficiencia la energía eléctrica entre dos circuitos separados, mediante el uso de metamateriales, permitiendo la deseada carga inalámbrica a distancias mayores de móviles, tabletas, etc.
- Diseño de nuevos metamateriales ENZ (por sus siglas en inglés Epsilon Near Zero) en la banda de terahercios (THz), banda de frecuencias localizada entre la de altas microondas y la infrarroja con enormes potenciales de aplicación en biomedicina, radioastronomía o en seguridad, para detección de explosivos.
- Desarrollo de metamateriales quirales a nivel óptico para nanomotores moleculares
- Desarrollo de la Metatrónica, un campo en el que se estudia la interacción de la luz con metamateriales en la escala nanométrica, comprobándose que a frecuencias ópticas estos elementos presentan comportamientos que pueden emularse a los elementos en circuito tradicionales, (condensadores, inductores, resistencias), lo cual nos permite trasladar a los metamateriales y cir-

cuitos ópticos los conceptos conocidos de la teoría de circuitos.

- Los metamateriales tendrán una aplicación mucho más profunda debido a que hay una analogía formal entre la matemática de los espacios electromagnéticos, la de la relatividad general y el espacio-tiempo que ella describe. Esto significa que es posible reproducir y/o simular dentro de un metamaterial una copia exacta de muchas de las características del espacio-tiempo de un agujero negro y otros cuerpos estelares.
- Por analogía, en el rango acústico, el metamaterial tendrá un rol protagónico en el diseño de aviones menos ruidosos. Las aeronaves han sido construidas para ser ligeras y no para ser silenciosas. El material con que se construyen los aviones tiene una estructura en forma de panal de abejas, compuesto por decenas de pequeños hexágonos, que dan resistencia y flexibilidad a la estructura pero transmiten el sonido de los motores directamente a los oídos del pasajero. Esto aumentaría en teoría el peso en apenas un 5% mientras que podría reducir el ruido hasta 25 decibelios.
- Un metamaterial acústico es una estructura artificial realizada mediante el agregado de uno o varios materiales que han sido seleccionados por sus propiedades nuevas tales como la densidad de masa negativa o la compresibilidad negativa o ambas cosas a la vez, necesarias en amortiguar efectos de sismos y terremotos.
- Aprovechar materiales que tienen un índice negativo de refracción podría hacer posible tomar imágenes ópticas de objetos que son más pequeños que la longitud de onda de la luz visible, incluyendo moléculas tales como el ADN y tipos nuevos de componentes electrónicos que usen luz en lugar de corrientes eléctricas para transmitir señales y procesar información, dando por resultado comunicaciones más rápidas.

Un estudio más amplio y más profundo de diversos tipos de metamateriales se encuentra en la última referencia de este artículo.

CONCLUSIONES

El tema de la invisibilidad han sido uno de los mayores avances en el campo de

los metamateriales, y varias técnicas son actualmente disponibles para suprimir la dispersión electromagnética de diferentes objetos. Hasta el momento, sin embargo, los resultados experimentales han mostrado retos fundamentales en términos de ancho de banda y tamaño del objeto a ser ocultado. Resultados recientes sugieren que nuevas direcciones, que involucren no linealidades, metamateriales quirales y activos, se hacen necesarias para realizar el encubrimiento de objetos macroscópicos con un suficiente banda ancha, abriendo una nueva fase en la búsqueda de la invisibilidad con metamateriales.

PARA SABER MÁS

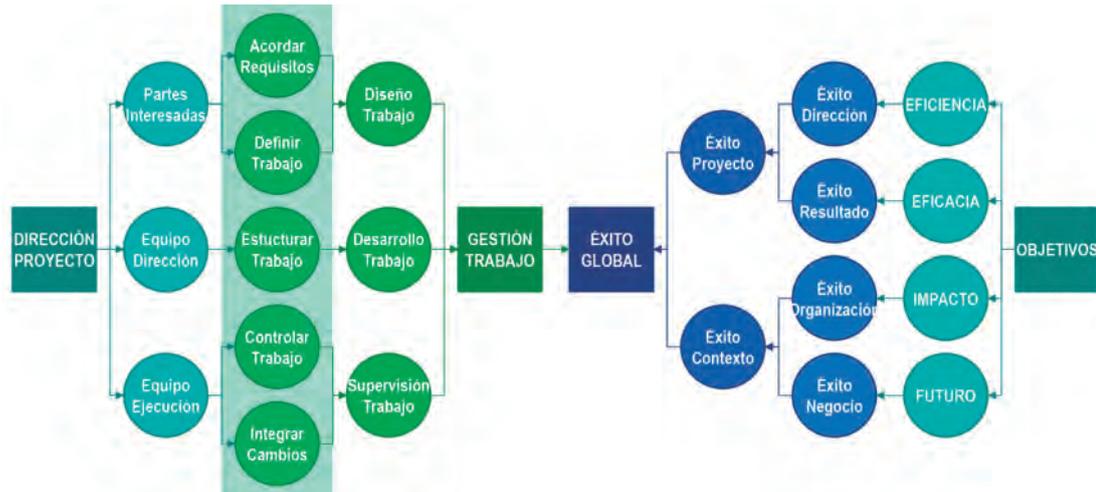
- [1] <http://www.plataformasinc.es/index.php/Noticias/Desarrollo-de-metamateriales-para-antenas-de-telecomunicacion>.
- [2] <http://es.wikipedia.org/wiki/Metamateriales>
- [3] <http://www.solociencia.com/ingenieria/06021119.htm>
- [4] <http://www.innovaticias.com/innovacion/34258/Crean-primer-metamaterial-cabe-chip-refraccion-cero>
- [5] <http://metamaterials.duke.edu/origins>. David Smith Research group.
- [6] <http://users.ece.utexas.edu/~aalu/>
- [7] D. M. Lipkin, J. Math. Phys. 5, 696 (1964).
- [8] V. G. Veselago. The electrodynamics of substances with simultaneous negative values of ϵ and μ Sov.Phys.Usp. 1968, V. 10, P. 509-514.
- [9] J. B. Pendry and D. R. Smith. Reversing light with negative refraction. Physics Today. 2004, V. 57, P 37-43.
- [10] D. Schuring et al, Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies, Science, 314, (580), P 977-980.
- [11] H. Torres-Silva. Chiral waves in Metamaterial medium, International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology, 2, (2), P 54-65, 2011
- [12] H. Torres-Silva Negative Refraction in Chiral Plasma Media, Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 2013, 5, 175-181.
- [13] H. Torres-Silva, Diego Torres Cabezas Chiral Seismic Attenuation with Acoustic Metamaterials, Journal of Electromagnetic Analysis and Applications Vol.5 No.1 (2013) P 10-15.
- [14] H. Torres-Silva, A Transmission Line Model with Metamaterial Effects in Gamma Ray Bursts, Journal of Electronics and Communication Engineering Research, Volume 3, Issue 5 (2016) P 12-17.
- [15] Xingjie Ni, Zi Jing Wong, Xiang Zhang et al. "An Ultra-Thin Invisibility Skin Cloak for Visible Light". Science Vol 349, Issue 6254, (17 de Septiembre, 2015).
- [16] F. Montinoque, A. Alù, Invisibility exposed: physical bounds on passive cloaking, Optica, vol 3, N° 7, (2016), P 718-724.
- [17] H. Torres-Silva. Una revisión sobre los metamateriales. DYNA New Technologies. Enero-Diciembre 2017, vol. 4, no. 1, p.[No Consta]. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT8331>

De acordar requisitos a integrar cambios: claves para no fracasar en los proyectos de construcción

From requirements agreement to changes integration: keys for not failing in construction projects

Alberto Cerezo-Narváez, Manuel Otero-Mateo, Andrés Pastor-Fernández
Universidad de Cádiz (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8261>



El sector de la construcción ha ejemplificado la intensa y compleja crisis socioeconómica que ha sufrido España en el período 2008-2015, como señala el Consejo Económico y Social [1], desapareciendo más del 30% de sus empresas y menguando su peso más de un 50%.

Asimismo, las cuestiones relacionadas con el éxito siguen de actualidad, dados los resultados imperantes:

- De acuerdo al informe de *PricewaterhouseCoopers* [2], sólo el 2,5% de las empresas completan con éxito el 100% de sus proyectos.
- En el sector de la construcción, los datos publicados por KPMG [3] reflejan la baja productividad que caracteriza a sus proyectos:
 - <30% terminan por debajo del 110% del presupuesto planificado
 - <25% terminan por debajo del 110% del cronograma planificado
- El Project Management Institute -PMI-, en su pulso de la profesión [4], revela que la consecución de las metas del proyecto y objetivos del negocio se consiguen en las organizaciones con una probabilidad:
 - >70% con cultura en dirección de proyectos
 - <50% sin cultura en dirección de proyectos

En resumen, en el sector de la construcción español, se revela un contexto en el que

escasean las oportunidades, con un pobre aprovechamiento de las que surgen, pero cuyo desempeño mejora con el uso de prácticas maduras, como establece, holísticamente, el modelo organizacional de la *International Project Management Association-IPMA-* [5].

Gracias a la colaboración de colegios y asociaciones profesionales españolas relacionadas con el sector de la construcción y la dirección de proyectos, Cerezo-Narváez et al. [6] identifican los factores críticos que relacionan, de un modo causal, la gestión del trabajo en los proyectos con el éxito sostenido.

La gestión del trabajo se muestra como la primera dimensión del éxito, por su naturaleza globalizadora y significancia predictiva, obteniendo la información precisa para determinar las necesidades y expectativas de los interesados, recopilando requisitos con su compromiso y participación activa, definiendo los límites, organizando su planificación y comprobando su fiabilidad e integridad, descomponiendo actividades, impidiendo la omisión de tareas y evitando su duplicidad; así como recibiendo información sobre su situación, eliminando la resistencia al cambio, resolviendo problemas, adoptando medidas que prevengan su corrupción y creando valor mediante la entrega de resultados. Para ello, la dirección del proyecto ha de hacer valer sus competencias, aumentando la madurez de su organización, a través del viaje hacia la excelencia. En consecuencia, el éxito parte de las decisiones estratégicas que permiten el cuidado de los factores que, sin ser condición suficiente, son necesarios para alcanzar los objetivos deseados.

Siguiendo las recomendaciones propuestas por la norma ISO 21500 [7], e incluyendo el enfoque humanista, basado en competen-

cias de IPMA [8] y por procesos de PMI [9], proveedor del marco referencial, Cerezo-Narváez et al. [6] presentan un modelo estructural que responde a las claves para lograr el éxito global, en sentido transversal e incluyente, como sugiere la norma ISO 9004 [10].

El modelo, a partir de sus etapas constituyentes, destaca las variables que pueden impedir el fracaso, proporcionando los fundamentos que permiten intervenir sobre los aspectos más relevantes, emprendiendo acciones que minimicen sus efectos negativos.

En definitiva, en el contexto del sector de la construcción español, la gestión del trabajo se manifiesta como una de

las principales causas del éxito global, como compendio del éxito de los proyectos, del negocio y de las organizaciones.

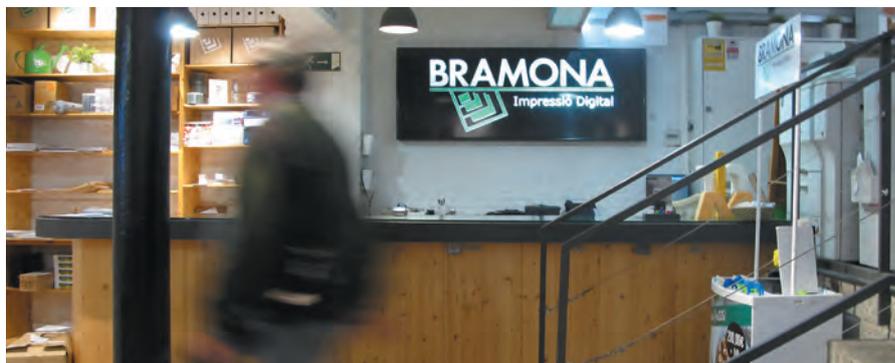
REFERENCIAS

- [1] Consejo Económico y Social. El papel del sector de la construcción en el crecimiento económico: competitividad, cohesión y calidad de vida. Madrid:CES,2016. ISBN-9788481883572.
- [2] PwC. 4th Global Portfolio and Programme Management Survey. Londres:Pricewaterhouse Coopers,2014.
- [3] KPMG International. 9th Global Construction Project Owner's Survey. KPMG:Amstelveen,2015.
- [4] Project Management Institute. Pulse of the Profession: 8th Global Project Management Survey. Newtown Square:PMI,2016.
- [5] International Project Management Association. Organisational Competence Baseline for Developing Competence in Managing by Projects. Versión 1.1. Zurich:IPMA,2016. ISBN-9789492338068.
- [6] Cerezo-Narváez, Alberto, Otero-Mateo, Manuel y Pastor-Fernández, Andrés. Influence of scope management in construction industry projects. DYNA Management. 2016. Vol. 4-3. DOI 10.6036/MN7943.
- [7] Asociación Española de Normalización y Certificación. UNE-ISO 21500. Directrices para la dirección y gestión de proyectos. Madrid:AENOR,2013.
- [8] International Project Management Association. Individual Competence Baseline for Project, Programme & Portfolio Management. Versión 4. Zurich:IPMA,2015. ISBN-9789492338013.
- [9] Project Management Institute. Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos. Versión 5. Newtown Square:PMI,2013. ISBN-9781628250091.
- [10] Asociación Española de Normalización y Certificación. Gestión para el éxito sostenido de una organización. UNE-EN ISO 9004. Madrid:AENOR,2009.

La impresora HP PageWide XL 5000 da competitividad al negocio familiar en el Mercado de Gran Formato.

Un aumento de la producción y un flujo de trabajo más dinámico gracias a la impresora HP PageWide XL 5000 lleva a Bramona a expandir de manera significativa sus servicios de impresión.

Bramona impresión digital, situada en Barcelona, comenzó en el año 1965 como una copistería y reprografía local. Casi 30 años más tarde, el hijo de su fundador, Albert Bramona, introdujo el negocio al mundo digital para satisfacer las demandas de un mercado en constante transformación. Ahora que el sector continúa creciendo, esta reprografía ha escogido la impresora HP PageWide XL 5000 para afianzar su posición como líder en el mercado de la impresión digital. Gracias a las características orientadas a los resultados, Bramona ha aumentado su productividad y ha simplificado su flujo de trabajo, permitiendo diversificar de manera significativa su actual cartera de clientes.



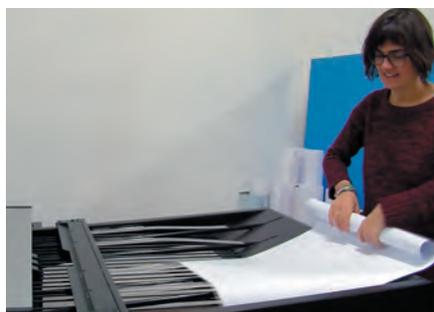
Antes de instalar la impresora HP PageWide XL 5000, Bramona atendía casi en exclusividad a las demandas del mercado técnico, principalmente ingenieros y arquitectos. Entonces la demanda en offset por volumen y tamaño era mayor, y la empresa podía hacer frente a la misma con sus propios recursos. Sin embargo, el mercado comenzó a requerir formatos más pequeños y el número de copias disminuyó, por ello Bramona incorporó la impresión digital al negocio para aumentar su capacidad de proporcionar al cliente trabajos de alta calidad de forma rápida.

Con la adquisición de la impresora HP PageWide XL 5000, esta empresa familiar mantiene su competitividad, y ha experimentado un aumento en su capacidad de producción, otorgando la versatilidad que su equipo de 10 personas necesitaba. Como resultado, Bramona hoy es capaz de ofrecer casi cualquier servicio de impresión digital a estudios de diseño gráfico, agencias de relaciones públicas, de viajes, empresas de marketing, etc. Cumplir con los plazos de entrega antes era un reto, ahora puede atender todos los trabajos de sus clientes y cumplir con los tiempos fácilmente.

Una producción más rápida significa más versatilidad

Antes de adquirir la HP PageWide XL 5000, Bramona perdía muchos trabajos. Al principio, el equipo trabajaba con dos impresoras que a menudo limitaban su capacidad para hacer frente a una mayor demanda de trabajo. Ahora, la HP PageWide XL 5000 puede hacer el trabajo de estas dos impresoras y mucho más, la producción de la empresa ha aumentado significativamente, siendo hoy capaces de ofrecer más opciones. Albert Bramona explica, *"puedo recordar al menos 3 o 4 trabajos del mes pasado donde la prioridad número uno del cliente era el tiempo de entrega; tenemos que responder con rapidez, por eso necesitamos impresoras que puedan atender esta necesidad"*. Por supuesto, cumplir estas demandas tan exigentes requiere estar preparado. La impresora HP PageWide XL 5000 proporciona una rápida entrega de documentos en blanco y negro y color, una velocidad de hasta 14D/A1 por minuto, y en tan solo 30 segundos ya está impresa la primera página, lo cual es sencillamente impresionante. Una

de las razones de su velocidad es la nueva tecnología de impresión PageWide: el cabezal no se desplaza encima del papel, sino que el papel pasa por debajo del cabezal estático, lo que permite aumentar la velocidad de impresión y reduce la posibilidad de atasco. A este ritmo, Bramona es mucho más competitiva y ofrece tiempos de entrega que antes no eran posibles. *"Cuando teníamos trabajos de mayor envergadura y con plazos de entrega muy cortos, no podíamos atenderlos con la misma atención que ahora con la impresora HP PageWide XL 5000"*, afirma Albert.



Un flujo de trabajo más simplificado y económico

La impresora HP PageWide XL 5000 permite incorporar un flujo de trabajo más eficiente para la empresa. Con las impresoras que tenían antes, todo el trabajo estaba centralizado en un solo ordenador, lo cual significaba que solo podía enviar los trabajos a impresión un operario a la vez. El software HP SmartStream permite al equipo enviar documentos desde diferentes puntos, creando un proceso de trabajo más fluido.

Según Bramona, el nuevo sistema es *"mucho más simple, más rápido, y definitivamente más eficiente comparado con el de antes. El trabajo se lleva a cabo de forma ordenada y clara; realmente ha cambiado nuestra manera de trabajar en la oficina muchísimo. Somos más productivos porque es más fácil y rápido"*. Con la HP PageWide XL 5000 se pueden combinar impresiones en blanco y negro y color en la mitad de tiempo¹, consiguiendo a la vez hasta un 30 % de ahorro en los costes de producción.²

Velocidad con una calidad de impresión excelente.

La tecnología que hay detrás de la impresora HP PageWide XL 5000 ofrece nuevas posibilidades de crecimiento en el negocio gracias a una velocidad incomparable.

Bramona afirma que esto es lo que ha hecho que la impresora sea indispensable para el negocio, *"principalmente debido a la velocidad y la calidad sobre todo en documentos técnicos, mapas, planos, etc. Esto nos permite dedicar más tiempo y recursos a otros trabajos y proyectos"*.

A pesar del crecimiento de la empresa y el aumento de la producción, el compromiso de Bramona de ofrecer la máxima calidad de impresión sigue siendo su prioridad. La impresora HP PageWide XL 5000 ofrece impresión a color con líneas nítidas, excelentes detalles, y suaves escalas de grises que superan a la impresión LED.³ La tinta pigmentada original HP PageWide XL, tanto para colores oscuros como para colores intensos, es resistente a la humedad y no destiñe, incluso en papel reciclado.⁴

La tecnología de HP PageWide ha sido diseñada para ayudar a negocios a incorporar un flujo de trabajo más dinámico gracias a un proceso de impresión más eficiente. Con un solo dispositivo para impresión en color y blanco y negro, las empresas ahora pueden asumir más capacidad de trabajo que nunca.



Impresora multifunción HP PageWide XL 5000

Más información en:
www.bramona.com
www.hp.com/go/pagewidexl

¹ Según pruebas internas de HP sobre la impresora HP PageWide XL 5000 comparadas con la preparación e impresión del mismo trabajo en dos impresoras distintas (una impresora LED en blanco y negro de volumen medio para las páginas en blanco y negro y una impresora en color para las páginas en color). Para conocer los criterios de prueba, véase <http://hp.com/go/pagewidexlclaims>.

² Ahorros en costes de producción basados en una impresora HP PageWide XL 5000 en comparación con una combinación de impresora LED en blanco y negro de volumen medio y una impresora en color de volumen medio (ambas de menos de 40.000 USD) a fecha de abril de 2015. Los costes de producción consisten en costes de suministros y mantenimiento, costes de energía de la impresora y costes del operador. Para consultar los criterios de prueba, véase <http://hp.com/go/pagewidexlclaims>.

³ Para productos impresos con impresoras HP PageWide XL e impresoras LED de diferentes fabricantes y que representan más del 50% de los envíos anuales de impresoras LED en Norte América hasta 2014, según IDC. Para consultar los criterios de prueba, véase <http://hp.com/go/pagewidexlclaims>.

⁴ Comparado con impresiones producidas con tintas HP 970/971/980 que son resistentes a la humedad y no destiñen según el certificado ISO 11798 de métodos de permanencia y durabilidad. Para consultar los criterios de prueba, véase <http://hp.com/go/pagewidexlclaims>.

Arquitectura de microservicios para reconocimiento multi-dimensional de características utilizando un modelo de representación de conocimiento, basados en la percepción humana

Microservices architecture for multi-dimensional feature recognition using a knowledge representation model, both based on human perception

Lisardo Prieto González, Beatriz Puerta Hoyas, Antonio de Amescua Seco
Universidad Carlos III de Madrid (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8254>

El crecimiento de Internet y la aparición de nuevas tecnologías y tendencias, como el IoT (*Internet of Things*, Internet de las cosas) junto con los hábitos recientes, tales como el extenso uso de los teléfonos inteligentes y las redes sociales, desencadenaron un fenómeno denominado *Information Overload* (o sobrecarga de información) [1]. El volumen estimado de datos generados por los usuarios es cercano a los 1,25 millones de imágenes por minuto [2]. Sin embargo, la infraestructura de la Web está construida en base al texto. Incluso muchos de los principales motores de búsqueda se basan en texto. Para

el caso de las imágenes, utilizan (en caso de estar disponibles) las meta etiquetas de información asociadas, que proporcionan una representación textual de las imágenes, pero éste enfoque está cambiando hacia un mejor y más sofisticado esquema.

La motivación tras este trabajo es el emular la manera en la que los seres humanos asimilan la información a través de los sentidos, a fin de desarrollar un nuevo y amplio rango de aplicaciones (tales como biometría mejorada, análisis y seguimiento de vehículos, detección automática de contenido ilegal en sitios web, recomendadores y motores de búsqueda avanzados, entre otros) basadas en un sistema inteligente capaz de aprender autónomamente del entorno, refinar y extender el conocimiento existente y de combinar la información aprendida dentro de una base global de conocimiento, incluyendo un conjunto de propiedades

al menos tan grande como la variedad de sensores involucrados en la captura (ej. visual, acústico, táctil, químico, etcétera), para desarrollar conceptos nuevos, más complejos y completos, ideas y teoremas de forma eficiente.

El presente trabajo extiende uno anterior, centrado en la característica perceptual de la visión [3]. Los principales objetivos de dicho estudio son el encontrar un modelo adecuado para cubrir la falta de funcionalidades en las soluciones existentes, tales como el análisis de imágenes multidimensional, o el análisis semántico complejo, así como la extensión y refinado del marco de referencia propuesto en [4]. El estudio anterior devolvió resultados prometedores en términos de factibilidad de la solución y mejora de rendimiento comparado con el uso de arquitecturas tradicionales no distribuidas. Sin embargo, las pruebas fueron llevadas a cabo

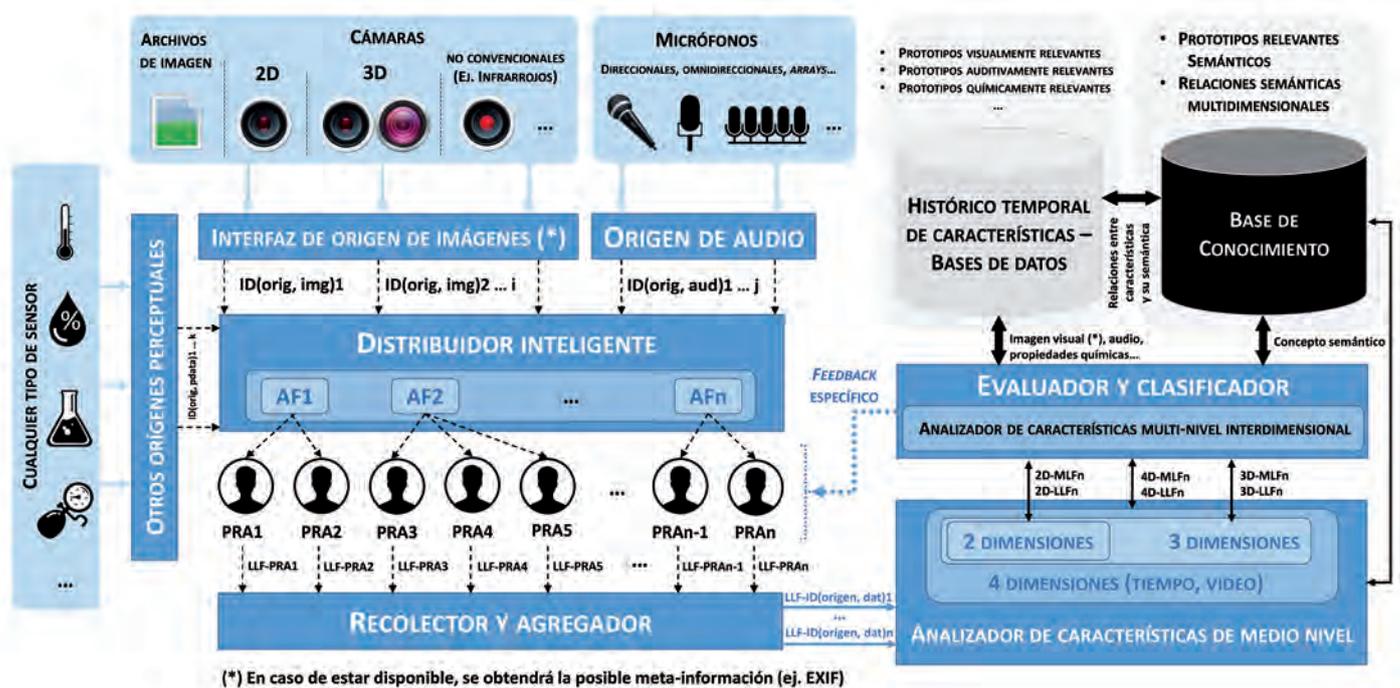


Fig. 1: Arquitectura y modelo reconocedor de características multi-dimensional

utilizando únicamente agentes inteligentes centrados en el reconocimiento simple de patrones, los cuales utilizaban algoritmos voraces simples. Tras actualizar dichos agentes para probar el rendimiento en un escenario más complejo de reconocimiento, aparecieron algunos problemas con la precisión. El nuevo escenario de pruebas consistió en el reconocimiento de frutas cítricas. Específicamente, un conjunto de naranjas, pomelos, limones y limas de diversos tamaños y puntos de maduración. Mediante el uso de cuatro redes neurales específicamente entrenadas para cada tipo de fruta, los resultados fueron bastante buenos en promedio, pero en varios casos, las probabilidades de que una fruta fuese erróneamente reconocida como una naranja en lugar de como un pomelo, o de ser erróneamente reconocida como un limón en lugar de como una lima (o vice-versa), fueron ligeramente elevadas. La arquitectura mejorada y basada en microservicios añadió, vía visión estéreo, el reconocimiento de medidas simples (anchura, altura y profundidad) de la caja circunscrita conteniendo a la fruta, así como el nivel de acidez de la misma (medido e introducido de forma manual en el sistema). Mediante el uso de esta nueva información perceptual, en conjunto con los resultados estadísticos devueltos por las redes neurales, el reconocimiento de cada ejemplar fue casi perfecto, pudiendo identificar inequívocamente cada fruta con su correspondiente clase.

Como conclusión, la adición de más fuentes de información, además de la visión, correspondientes a la información que puede ser percibida de manera similar a como lo hace el ser humano, permite tener mejor conceptualización semántica de los elementos reconocidos, pudiendo ser almacenada en una base general de conocimiento. Esos elementos conceptualizados semánticamente de una forma mejorada y natural también pueden ser utilizados para aumentar las capacidades de reconocimiento de los agentes inteligentes al considerar características adicionales relevantes, las cuales en algunos casos, podrían ser decisivas para el reconocimiento de objetos en el entorno, como ha sido observado en el experimento, o para determinar nuevas subclases en la taxonomía correspondiente al elemento general utilizado como prototipo de clase. El modelo propuesto ha demostrado un mayor rendimiento en términos de tiempo y precisión en comparación con los reconocedores individuales en el campo de pruebas, por lo que parece un enfoque novedoso e interesante hacia un sistema de reconocimiento natural multi-propósito automatizado, que todavía debe ser refinado y extendido.

REFERENCIAS

- [1] Eppler Martin J and Mengis Jeanne. "The Concept of Information Overload: A Review of Literature from Organization Science, Accounting, Marketing, MIS, and Related Disciplines". The Information Society. Vol.20-5 p.325-344. Nov. 2004 DOI: 10.1080/01972240490507974.
- [2] Griffith Erin. "Algorithms that can 'see' images on the Web". Fortune (online ed.). Jan. 2015.
- [3] Prieto González Lisardo, Puerta Hoyas Beatriz, and de Amescua Seco Antonio. "Distributed multi-dimensional feature recognition and multi-level semantic classification model for computer vision". DYNA New Technologies. Vol.3-1 Dec. 2016 DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT7791>.
- [4] Prieto-González Lisardo, Stantchev Vladimir, and Colomo-Palacios Ricardo. "Applications of ontologies in knowledge representation of human perception". International Journal of Metadata, Semantics and Ontologies. Vol.9-1 p.74-80. 2014 DOI: 10.1504/IJMSO.2014.059128.

El poder en sus manos

HP ha reinventado la productividad en impresión de gran formato con la impresora HP PageWide XL 5000 para que usted tenga la posibilidad de potenciar su ahorro. Use el mismo dispositivo para trabajos en blanco y negro o en color. Y con una velocidad de hasta 14 páginas A1 por minuto, podrá imprimir con los mismos costes o costes más bajos que con las impresoras LED comparables¹.

Más información:

+34 930 031 133

www.hp.com/go/pagewidexl/5000series



1. Basado en los costes de suministros y de mantenimiento. Costes de impresión en blanco y negro de documentos técnicos para impresoras LED comparables de volumen medio basados en impresoras para impresión en gran formato de documentos técnicos a velocidades de entre 8 y 13 páginas D/A1 por minuto a fecha de abril de 2015, y que representan más del 80 % de la cuota de impresoras LED de volumen medio en EE. UU. y Europa en 2015, según IDC. Costes de impresión en color de documentos técnicos para impresoras en color comparables de volumen medio basados en impresoras capaces de imprimir 4 páginas D/A1 por minuto o más y de menos de 50 000 USD para la impresión en gran formato de documentos técnicos a fecha de abril de 2015, y que representan más del 80 % del mercado en EE. UU. y Europa en 2014, según IDC. Para consultar los criterios de prueba, véase hp.com/go/pagewidexlclaims.

Aplicación del análisis de regresión para el estudio de las pymes productivas españolas que obtienen informes motivados vinculantes de proyectos de I+D+i

Application of the regression analysis for studying Spanish producers SMEs get binding motivated reports about projects R&D&I

Ana-Isabel Pérez-Molina¹, Víctor Gisbert-Soler² y Pablo Díaz-García³
Universitat Politècnica de Valencia (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8249>

La innovación en las Pymes en base a proyectos de I+D+i es un factor clave para el desarrollo empresarial. Coexisten estudios cuantitativos relacionados con la I+D+i, pero si una sociedad pretende innovar no dispone de información sobre las estructuras, formas de trabajar, etc. que utilizan las entidades que ya innovan [1].

Para modelizar en base el análisis de regresión a las pymes productivas españolas que realizan proyectos de I+D+i se ha analizado una muestra de 80 empresas españolas con una metodología de análisis propia [2], se ha caracterizado dicha muestra con un análisis univariante y bivariante [3], se ha aplicado un análisis discriminante [4], y finalmente se ha realizado un análisis de regresión [5]. La característica común de dichas compañías es que han conseguido al menos un Informe Motivado Vinculante, en alguna de las anualidades trabajadas.

Se han analizado diversas variables y se han obtenido modelos de regresión que permiten obtener una ecuación que determina el valor de una variable dependiente en función de diversas variables independientes. Concretamente se han trabajado las siguientes variables [13]:

Número de trabajadores. Existen variables comunes a diversos modelos: Número de trabajadores de los años anteriores; Número de personas que se dedican a los proyectos (en sus diferentes tipologías); Existencia de plan estratégico general y de I+D+i o tecnológico; Nivel de estructuración del departamento de I+D+i; Valoración del grado de evidencias de los proyectos; Participación del gerente en los proyectos y gasto aceptado por el MINECO en la partida personal interno en

I+D+i en los proyectos. Estas regresiones han permitido verificar que el tamaño de las empresas no es un factor determinante en la mayoría de las características cualitativas de los proyectos de I+D+i.

Facturación / número de empleados. Las variables más influyentes son: Facturación de los años anteriores; Número trabajadores en la anualidad 2006; Número de personas dedicadas a la I+D+i (diferentes tipologías); Gastos aceptados por el MINECO en las diferentes partidas de los proyectos; Problemas para financiar la I+D+i y mecanismos de comunicación interna. Estas regresiones no han permitido validar la hipótesis de que las empresas con mayor gasto en I+D+i, facturan más por persona ocupada.

Gasto justificado en I+D+i. Las variables que más influyen en el gasto justificado en I+D+i son: Número de personas dedicadas a la I+D+i (en sus diferentes tipologías), en la anualidad analizada y en las anteriores; Nivel de aprovechamiento de las ayudas públicas; Inversiones elementos inmovilizado material e intangible y gastos aceptados por el MINECO en las diferentes partidas, en la anualidad analizada y en las anteriores.

Presupuesto del proyecto. Se dispone de varias rectas de regresión capaces modelar el presupuesto total (I+D+i) del proyecto y el presupuesto en I+D, pero no se ha conseguido ningún modelo que represente el presupuesto en IT. Los parámetros influyentes son: Número de personas dedicadas al proyecto (en sus diferentes tipologías); Duración del proyecto; Las cantidades subvencionadas a fondo perdido, los créditos preferentes y las cantidades prestadas por entidades financieras.

Gasto justificado del proyecto. Se han conseguido rectas de regresión que modelan el gasto justificado total (I+D+i) y el gasto justificado en I+D de los proyectos, ahora bien, no se ha conseguido ningún

modelo para el gasto en IT. Los parámetros más influyentes son los mismos que afectan al presupuesto de los proyectos.

Gasto aceptado por el MINECO del proyecto. Se han conseguido rectas de regresión que modelan el gasto aceptado total (I+D+i), el aceptado en I+D y el aceptado en IT. Las variables más influyentes son: Número de personas dedicadas al proyecto (en sus diferentes tipologías); Aprovechamiento de las ayudas públicas; Cantidades prestadas por entidades financieras; Gastos justificados y el hecho de que la novedad tecnológica sea nacional, internacional o interna.

En resumen, se han conseguido relaciones complejas entre los diversos aspectos de las pymes productivas españolas que realizan proyectos de I+D+i, consiguiéndose por lo tanto, modelos basados en rectas de regresión capaces de asistir a las empresas españolas hacia conseguir incluir la I+D+i en su estrategia empresarial.

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Economía y Competitividad. "Informes Motivados para deducciones fiscales por actividades de I+D e innovación tecnológica". 2012.
- [2] Pérez-Molina AI, Díaz-García P, Gisbert-Soler, V. "Development of a systematic analysis for the characterization of spanish productive SME performing projects R&D&I". International scientific Conference. Innovative solutions for sustainable development of textiles and leather industry. May, 23rd - 24th, 2014 Oradea/Romania. University of Oradea, 2014. Issn: 1843-813X.
- [3] Pérez-Molina AI, Gisbert-Soler, V, Díaz-García P. Caracterización de pymes productivas españolas que realizan proyectos de I+D+i en base a Informes Motivados Vinculantes. DYNA Management. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/MN7840>
- [4] Pérez-Molina AI, Díaz-García P, Gisbert-Soler, V. Análisis discriminante aplicado a la pymes productivas españolas que realizan proyectos de I+D+i. DYNA Management. <http://dx.doi.org/10.6036/MN7925>
- [5] Pérez-Molina AI, Gisbert-Soler V, Díaz-García P. Aproximación inicial al análisis de regresión aplicado a la pymes productivas españolas que realizan proyectos de I+D+i. DYNA Management. <http://dx.doi.org/10.6036/MN7926>



EXPOQUIMIA
Encuentro Internacional
de la Química



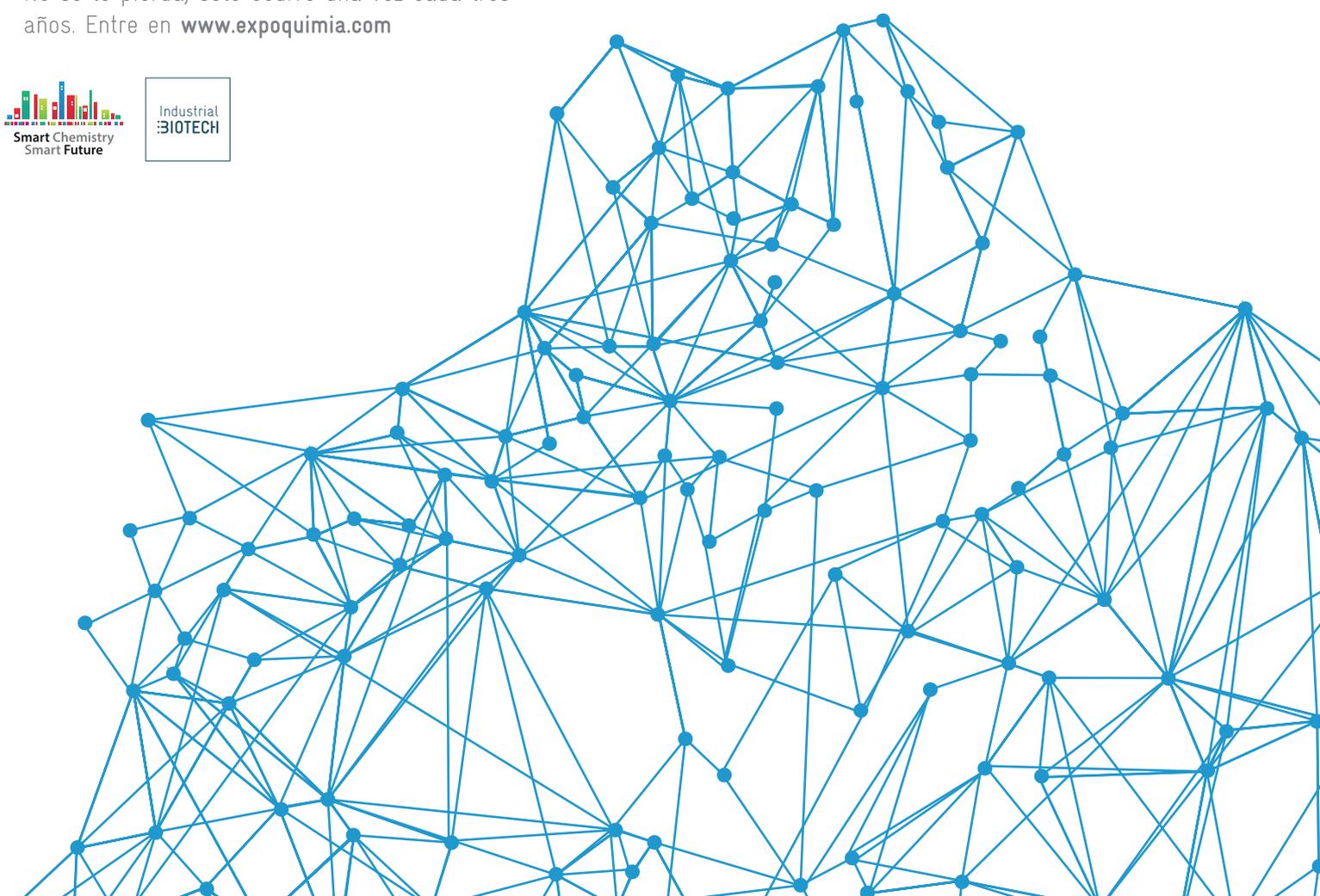
Fira Barcelona

2-6 OCTUBRE 2017

RECINTO GRAN VIA

CHEMISTRY FOR THE FUTURE

- Sea el primero en llegar al futuro participando como experto, expositor o visitante.
- Inscríbese en nuestras actividades de *networking*, jornadas técnicas y congresos.
- No se lo pierda, solo ocurre una vez cada tres años. Entre en www.expoquimia.com



Co-located events:



10th World Congress
of Chemical Engineering

Global Partners:



A PART OF
BARCELONAINDUSTRY Week

www.expoquimia.com



¿Son más "verdes" las empresas LEAN?

Are lean companies greener?

■ ■ ■ ■
Itziar Luján-Blanco, Jordi Fortuny-Santos
Universidad Politécnica de Cataluña (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8205>

En las últimas décadas, multitud de empresas en todo el mundo han buscado en los sistemas de producción ajustada o *lean manufacturing* (LM) una manera de ser más eficientes. Al mismo tiempo, ha crecido la presión sobre las empresas para que sean "verdes" o respetuosas con el medio ambiente. A simple vista, algunas características de LM parecen redundar en la conservación del entorno: LM lucha para reducir lo que denomina despilfarro (empleo de recursos que no añaden valor al producto) y la mejora ambiental busca la reducción en el consumo de energía, agua o materias primas y en la producción de residuos, por lo que, en el entorno actual, es interesante averiguar qué prácticas y herramientas de LM pueden contribuir a lograr una empresa más verde y cómo.

En los años 90 surgió en el *Massachusetts Institute of Technology* la denominada hipótesis *lean and green* (*lean* y "ver-

de"). Según ella, las empresas que aplican LM deben presentar unos mejores resultados en sus indicadores ambientales que las empresas que no aplican LM. Tras una búsqueda sistemática de la literatura [1], se observó que hasta diciembre de 2014 se habían publicado 61 artículos científicos sobre dicho tema en revistas recogidas en el prestigioso índice *Web of Science*.

De la lectura de dichas publicaciones, se desprende que la deseada relación no es obvia. Los objetivos de LM se centran en mejorar la producción. Dichas mejoras pueden tener efectos ambientales favorables cuando conllevan una reducción en el consumo de recursos pero también negativos (aumentar el consumo de agua para mejorar la calidad del producto). Por lo tanto, alguien debería coordinar y priorizar dichos aspectos si se desea que sean compatibles.

Al evaluar los estudios cualitativos revisados, se puede destacar que, aunque cada empresa narra su propia experiencia, en todos los casos resulta imprescindible una gestión de recursos humanos que posibilite la existencia de personas formadas, motivadas y comprometidas.

En los estudios cuantitativos, se obser-

va una gran dificultad: ¿Qué se entiende por LM y cómo se mide? ¿Qué indicadores corresponden a una empresa "verde"? Cada autor mide cuan lean es una empresa a través de una selección de principios, prácticas y herramientas de LM. En algún caso el indicador es desafortunado (por ejemplo, se identifica un sistema de gestión de la calidad con LM, cuando miles de empresas, sean o no lean, poseen dichos sistemas). Con el medio ambiente sucede algo parecido. Además, los indicadores ambientales están muy vinculados a la actividad productiva y por lo tanto no son extrapolables a otros sectores industriales. Probablemente esta disparidad de enfoques que no permite comparar los trabajos ha dificultado el avance de la investigación hacia nuevos objetivos.

A partir de los artículos revisados (tanto estudios de casos como trabajos empíricos con posterior análisis estadístico), se ha elaborado la Tabla I que muestra qué implicaciones ambientales concretas parecen tener los distintos elementos de LM. Dichos elementos se han agrupado en las cuatro prácticas definidas por Shah y Ward [2] (Recursos humanos, calidad total, mantenimiento TPM, y gestión de la producción), a las que se han añadido la gestión de la cadena de suministros y el diseño lean, cerrando la lista el principio general de reducción del despilfarro que es mencionado en la mayoría de los trabajos. Los resultados experimentales muestran que todas las prácticas pueden vincularse a aspectos ambientales y a la mejora (y a veces empeoramiento) de impactos ambientales.

La conclusión, por lo tanto, es que las prácticas LM pueden facilitar que las empresas sean "verdes", pero que esto exige la voluntad de querer conseguir dichos beneficios ambientales (sino, LM puede centrarse únicamente en la mejora del flujo productivo), la existencia de personal formado y motivado y la necesaria gestión que permita coordinar los objetivos de producción con los ambientales.

REFERENCIAS

- [1] Luján-Blanco I, Fortuny-Santos J. "Towards a green company through lean manufacturing. Review and state-of-the art". *DYNA Management*, Enero-Diciembre 2016, Vol.4 No.1 p.0. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/MN7813>
- [2] Shah R, Ward PT. "Lean manufacturing: context, practice bundles, and performance". *Journal of Operations Management*, 2003. Vol.21 No.2 p.129-149. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0272-6963\(02\)00108-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0272-6963(02)00108-0)

Prácticas y herramientas lean		Posibles implicaciones ambientales
1	Gestión de recursos humanos <i>Empowerment</i> , equipos autodirigidos, polivalencia	Personal formado para detectar oportunidades de mejora, con voluntad de implicarse en los proyectos y aportar soluciones. Compromiso con el uso eficiente de recursos.
2	Calidad total (TQM) Círculos de calidad, <i>Six Sigma</i> , Sistemas de gestión de la calidad ISO 9000, mejora continua, <i>kaizen</i>	Identificar oportunidades de mejora y prevención de la contaminación. La gestión de la calidad es similar a la gestión medioambiental ISO 14000. Calidad de producto puede relacionarse con consumo de materiales y agua, a veces, en sentido negativo.
3	Mantenimiento total (TPM) Mantenimiento autónomo, las 5 S	Mejora de procesos (también desde el punto de vista ambiental). Reducir consumos energéticos. Implantación nuevas tecnologías. Evitar pérdidas de aceite, fugas, incendios.
4	Gestión de la producción Estandarizar procesos, <i>kanban</i> , células, producción <i>pull</i> , reducción de existencias y lotes, cambios rápidos, Métodos A3, 5 <i>Why?</i> e " <i>Ir al Gemba</i> " Mapa de procesos <i>Value stream map</i> (VSM)	Identificar despilfarros. Reducción de consumo de materiales y energías. Reducción de retales y desperdicios. Reducción de consumo energético. Definición de procesos limpios. Identificar puntos de mejora en los procesos (consumo de agua, de energía, despilfarros de materiales).
5	Cadena de suministros (SCM) Gestión de proveedores, logística	Logística inversa. Recuperación de pallets. Ahorros de electricidad y de combustible (aunque también puede ser en sentido contrario). Prácticas ambientales conjuntas.
6	Diseño lean Principio general de minimizar despilfarros Las 7 <i>mudas</i>	Ecodiseño. Uso de proceso limpios. Ahorro energético. Diseño para el reciclado. Selección de materiales. Actitud de búsqueda de oportunidades para reducir uso de energía y materiales.

Tabla I: Implicaciones ambientales de las prácticas y herramientas lean en los artículos revisados

Optimización de simulaciones en puertos marítimos

Simulation optimization for seaport operations

Ricardo Pérez-Rodríguez¹, Arturo Hernández-Aguirre², Miguel Reyes²

¹ CONACYT (México)

² CIMAT A.C. Centro de Investigación en Matemáticas (México)

DOL: <http://dx.doi.org/10.6036/8281>

La logística y el transporte de mercancías entre diferentes destinos se están volviendo más complejas. El transporte marítimo en particular está recibiendo más presión para proporcionar servicios eficientes a sus clientes. Además, la competencia entre los puertos marítimos les ha obligado a buscar nuevas estrategias para mejorar la eficiencia de sus servicios. Por lo tanto desarrollar nuevas herramientas de decisión y/o nuevos algoritmos de optimización es muy importante para los operadores portuarios.

La eficiencia del puerto marítimo depende de la coordinación adecuada de los recursos. Un flujo continuo de contenedores en los procesos portuarios es necesario para garantizar eficiencia. Para mejorar la eficiencia mencionada en esta investigación se utiliza el tiempo medio de espera como una medida para monitorear el desempeño del puerto marítimo.

Se introduce un nuevo enfoque y/o algoritmo como una tendencia en la investigación de los puertos marítimos. En esta investigación se propone un nuevo algoritmo que utilizará el enfoque de optimización de simulaciones. Este nuevo algoritmo utiliza un modelo de probabilidad en lugar de los tradicionales operadores evolutivos como la cruza y la mutación utilizados en los algoritmos genéticos. Por lo tanto un modelo de probabilidad reemplaza a los operadores evolutivos mencionados para describir explícita y analíticamente la distribución del espacio de soluciones. Utilizamos un *Algoritmo de Estimación de Distribuciones* (por sus siglas en inglés EDA) como una rama del cómputo evolutivo. El modelo de probabilidad utilizado se basa en la técnica de suavizado *kernel*. Se considera un modelo de simulación para validar cada solución. La simulación se utiliza para modelar el entorno del puerto marítimo, mientras

que el EDA se utiliza para guiar el proceso general de búsqueda para identificar las mejores soluciones.

Diez instancias relacionadas a puertos marítimos se han desarrollado sobre la base de la metodología diseñada por Hartmann [1]. Esto replica condiciones de puerto real, para analizar la capacidad de solución del algoritmo propuesto. Las instancias son datos de entrada para todos los algoritmos. Las instancias están disponibles en <https://drive.google.com/file/d/0B2Cilz8pLvwoC3hwd3RKNWtPMjA/view?usp=sharing>

El *Algoritmo Genético* (GA), el *Algoritmo de Distribución Marginal Univariante* (UMDA) y el *Algoritmo de Maximización de la Interconexión de la Información Mutua* (MIMIC) se proponen como referencia para la comparación con el esquema EDA.

Aunque el MIMIC obtiene el mejor rendimiento en 5 de cada 10 casos, el EDA obtiene el segundo lugar en 6 de cada 10 casos. Parece dar argumentos para apoyar el estudio y la mejora del EDA propuesto para futuras investigaciones.

La estimación de la densidad *kernel* es una buena opción cuando no hay suficiente evidencia o información sobre la que el modelo paramétrico necesita [2]. Los resultados muestran que el algoritmo MIMIC superó al resto de los algoritmos en algunos casos específicos. Probablemente se deba a la naturaleza de esos casos específicos, en los cuales los supuestos gaussianos parecen ser apropiados para describir el proceso. Esto puede confirmar que cuando el modelo paramétrico es correctamente elegido, los resultados son buenos. Sin embargo, existen otros casos en los que el algoritmo MIMIC funciona pobremente y los algoritmos como el GA o el EDA obtienen mejores resultados incluso más que el algoritmo UMDA en general. Esto apoya la idea de que el enfoque no paramétrico es conveniente en los casos en los que falla el modelo paramétrico.

Los resultados obtenidos de esta investigación muestran el incremento porcentual relativo promedio (por sus siglas en inglés RPI) como el desempeño de los algoritmos. El algoritmo propuesto es competitivo, es decir, en 6 de cada 10 casos.

El esquema EDA es una opción válida para ser considerado en este tipo de problemas aplicados. Su desempeño parece ser muy similar al del algoritmo GA. Los datos también apoyan la idea de que los algoritmos UMDA y MIMIC proporcionan diferentes resultados. Se debe a que MIMIC considera información de entropía entre variables del problema cuando se muestrea la descendencia. Por el contrario, el UMDA sólo utiliza la distribución marginal de las variables. Además el EDA todavía puede mejorarse, por ejemplo al considerar las columnas como no independientes en el proceso de muestreo. Esto podría conducir a una versión más competitiva de este algoritmo en la investigación futura. Además condiciones de incertidumbre podrían considerarse como una investigación futura para obtener tiempos de espera más realistas.

REFERENCIAS

- [1] Hartmann S, Generating scenarios for simulation and optimization of container terminal logistics, *OR Spectrum*, 26 (2004) 171-192.
- [2] Pérez-Rodríguez R, Hernández-Aguirre A, Reyes-Cortes M, Simulation optimization to enhance the performance of the seaport operations, *DYNA New Technologies*, 4-1 (2017), DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT8143>.

Entornos gráficos 3D avanzados para la representación del relieve cartográfico

Advanced 3D graphics environments for the representation of the cartographic relief

■ ■ ■ ■
 Carlos Carbonell-Carrera, José-Luis Saorín-Pérez, Dámari Melián-Díaz
 Universidad de La Laguna (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8295>

Las habilidades espaciales figuran como competencia a adquirir en los planes de estudio de grados de Ingeniería adaptados al *Espacio Europeo de Educación Superior*, donde es frecuente el uso de mapas y representaciones cartográficas para el proyecto de obras de Ingeniería. Los mapas precisan de una percepción espacial por parte del usuario para interpretar tridimensionalmente lo representado. La aparición de nuevas tecnologías gráficas avanzadas ofrece una forma de interactuar con la representación del terreno que facilita el desarrollo de la capacidad de interpretación del relieve.

El propósito general de esta investigación ha sido el análisis del impacto que nuevas tecnologías de representación tridimensional tienen sobre la capacidad de interpretación del terreno en estudiantes de ingeniería. Para este objetivo se ha llevado a cabo un taller con estudiantes de ingeniería que trabajan con dos entornos de representación del relieve: digital y tangible, además de las representaciones convencionales en 2D (mapas). De este modo, un mismo modelo digital de terreno (MDT) se representa a través de técnicas digitales como la realidad aumentada y la visualización tridimensional y a través de representaciones tangibles como modelos impresos en 3D y generados por capas apiladas. El estudiante interactúa con el terreno representado por medio de gestos realizados con la propia mano, y visualiza el entorno geográfico de un proyecto aplicando giros, rotaciones, cambios de escala y de perspectiva, movimientos gestuales que le ayudan a resolver carencias en su percepción espacial y a desarrollar sus habilidades de interpretación cartográfica.

Estas tecnologías, además, son de bajo coste y con unos sencillos interfaces para el usuario, lo que permite su implantación en la docencia reglada. La realidad aumentada permite visualizar un modelo

digital de terreno enfocando con la cámara de un Smartphone una figura denominada marca, impresa en papel, que contiene la información digital del modelo representado. Los visualizadores 3D permiten la representación tridimensional de contenidos digitales, como las mallas tridimensionales que conforman un MDT. Existen un gran número de aplicaciones de acceso libre y gratuito de realidad aumentada y visualizadores 3D para Tablets y/o Smartphones (Android e iOS) además de las empleadas en este trabajo: AR-Media y 3D viewer.

Las representaciones tangibles tipo maqueta, ofrecen un entorno diferente de interacción con lo representado. Las impresoras 3D permiten la generación de modelos digitales de terreno partiendo de su formato digital a través de la adicción de material. Los MDT impresos en 3D ofrecen una gran precisión, pero tienen limitaciones de tamaño de impresión, además de necesitar mucho tiempo para su impresión. Por otro lado, la generación de MDT a través de superposición de capas apiladas en las que cada una de ellas representa una curva de nivel se puede hacer desde aplicaciones gratuitas como *Autodesk 123 Make*.

Para el análisis del impacto de estas tecnologías se ha utilizado un test que ofrece una media cuantitativa de la capacidad de interpretación del relieve (*Topographic Map Assessment Test*), además de someter a los participantes a un cuestionario que recoge su percepción sobre las tecnologías empleadas, comparándolas con las representaciones tradicionales bidimensionales.

Los resultados obtenidos muestran que el valor medio de la capacidad de interpretación del terreno de los participantes medido con el *Topographic Map Assessment test* ha experimentado un aumento estadísticamente significativo de 6.19 puntos, y mayor que el obtenido empleando representaciones tradicionales en 2D (2,22 puntos). Por género la diferencia en la ganancia entre hombres (6,47) y mujeres (5,87) no es significativa. Por otro lado, los resultados del cuestionario muestran que las tecnologías empleadas son altamente consideradas por los estu-

diantes, mostrando una preferencia por los modelos tangibles frente a los digitales. Los participantes afirman que estas representaciones les ayudan a comprender los conceptos de curvas de nivel, línea de máxima pendiente y perfil longitudinal.

Las nuevas tecnologías gráficas avanzadas de representación tridimensional ofrecen, por tanto, un nuevo entorno docente que desarrolla la percepción espacial del futuro ingeniero. Como futuro trabajo, se propone el análisis del potencial de otra tecnología emergente de representación de entornos 3D: la realidad virtual, con la cual el usuario puede experimentar una sensación de inmersión que ofrece nuevas oportunidades para el estímulo de su percepción espacial.

REFERENCIAS

- CARBONELL-CARRERA, Carlos, SAORIN-PEREZ, Jose Luis, MELIA-DIAZ, Damari. RELIEF INTERPRETATION: LOW COST 3D REPRESENTATION TECHNOLOGIES FOR TEACHING. *DYNA New Technologies*, Enero-Diciembre 2017, vol. 4, no. 1. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT8112>



La perfección de la impresión

La nueva gama de impresoras imagePROGRAF PRO ofrecen la tecnología líder en impresión fotográfica, ahora con modelos que van desde tamaños A2 hasta 60" y desde la impresión de pequeños trabajos hasta imprimir reproducciones de arte.

imagePROGRAF

Canon

Más información en
cbs_marketing@canon.es o visite
nuestra web: www.canon.es/lfp

Evolución de las escaleras mecánicas: divergencia entre los diseños teórico y real

The evolution of the escalators: divergence between theoretical and real design

Juan-David Cano-Moreno y José-María Cabanellas-Becerra
 Universidad Politécnica de Madrid (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8036>

La escalera mecánica pertenece al sector industrial del transporte vertical de personas que comprende una amplia variedad de medios. Entre los principales sistemas que responden a este campo, se encuentran las escaleras y pasillos mecánicos, los ascensores verticales o inclinados, las pasarelas de embarque o *fingers* empleadas en los aeropuertos, los teleféricos, los telesillas y otros más conceptuales como son los *skyhooks* y los ascensores espaciales. Se han representado en la Fig. 1.

Los autores comenzaron una línea de investigación para la búsqueda de la innovación radical en el sector de escaleras y pasillos mecánicos donde el mercado marca un mayor riesgo de convertirse en *commodity*, con el objetivo de evitar esta situación de línea muerta para las empresas del sector.

Para comenzar se realizó un exhaustivo análisis de patentes para conocer la evolución técnica de los diseños en este sector.

En este análisis, se encontró que los primeros diseños fueron patentados hace más de 150 años, por lo que la innovación en este sector podría suponer un gran reto. Como dice Basberg [1] las invenciones existentes de un campo o sector pueden dividirse en:

- Patentes (P)
- Innovaciones (I), invenciones que llegan a explotarse comercialmente
- Resto, invenciones que no son ni patentes ni han llegado a explotarse comercialmente.

Dado que se pretende catalizar la innovación en un sector, se ha considerado indispensable conocerle mejor en dos aspectos principales:

- Permeabilidad entre los diseños teóricos y reales (conjunto)
- Grado de evolución del sistema.

En la literatura se definen varios indicadores para representar el grado

de evolución de un sistema [1] [2] [3], describiendo distintos patrones de evolución [4] que permiten situar y predecir la posible evolución de un sistema técnico. La curva de la S [5], muestra las fases comunes a la evolución de diversas tecnologías.

La primera patente de unas escaleras mecánica data del año 1859, cuando Nathan Ames [6] patentó su denominada escalera triangular o rotatoria (*Revolving Stairs*) en Estados Unidos. Aunque este diseño no llegó a fabricarse, podría considerarse como el punto de inicio de la historia de las escaleras y pasillos mecánicos.

En 1892, Jesse Reno [7] patentó el primer *transportador sin fin* o *elevador* que era similar un pasillo móvil actual donde los peldaños eran plataformas de sección triangular curvadas que se desplazaban de forma continua sobre una cinta transportadora inclinada 25° capaz de cambiar el sentido de la marcha. Cada escalón poseía los actuales peines en la zona de salida y entrada de peldaños. Esta escalera mecánica fue la primera que se puso en funcionamiento, denominándose *El elevador inclinado* [8]. Esta escalera fue instalada en Nueva York [9] y en Manhattan en 1896.

Otro de los inventores que estuvo presente en los inicios de las escaleras mecánicas fue George Wheeler [7], que patentó en 1892 una escalera mecánica con los escalones planos que se desplazaban junto a una balastrada.

También destacaron otros autores por sus diseños innovadores desarrollados al final del siglo XIX, como son Leamon Souder [13] y Charles Seeberger [11].

Hoy en día podemos encontrar escaleras y pasillos mecánicos en diferentes lugares como centros comerciales, estaciones subterráneas, aeropuertos, etc. El diseño básico empleado no ha variado respecto a los patentados hace más de un siglo.

Sin embargo, sí que existen un gran número de patentes de diseños muy distintos del tradicional: a continuación se realizará un recorrido histórico-tecnológico cualitativo que nos permitirá conocer la evolución de las escaleras mecánicas durante los más de 150 años de su historia.

Por otro lado, se monitorizará y valorará de forma cuantitativa la evolución de



Fig. 1: Principales sistemas incluidos en el transporte vertical de personas

este sector a lo largo del tiempo mediante la construcción de curvas basadas en el número de patentes por año de los sectores relacionados con las escaleras mecánicas.

1. CRONOLOGÍA DE IDEAS INNOVADORAS

Para seguir la evolución del diseño de escaleras y pasillos mecánicos, se han construido dos ejes cronológicos dónde se representarán algunas de las ideas más

siendo el inventor pionero de este tipo de escaleras Charles David Seeberguer. También en esta época se empezó a dinamizar el diseño básico apareciendo una patente de escalera con velocidad variable [14] (1902).

En la línea de la escalera mecánica clásica, se mejoró la definición de las partes del diseño ya establecido, convergiendo al diseño que hoy día es tan usado en todo el mundo, como muestra una patente del año 1923 [15]. Una vez consolidado el diseño comercial básico de las esca-

del siglo XX, es cuando se patentó uno de los primeros pasillos mecánicos de velocidad variable [17] que permiten reducir el tiempo de viaje en aeropuertos y zonas donde el usuario tiene que recorrer largas distancias. En esta época se empieza a buscar formas de mitigar los riesgos de atrapamientos y se publican las primeras patentes que incluyen en el diseño de la escalera mecánica tradicional un zócalo móvil [18], que elimina la velocidad relativa entre el peldaño y el zócalo, algo que no se había abordado hasta ahora.

En la Fig. 3 se muestra el segundo eje cronológico, que ilustra los diseños patentados más actuales. En sus comienzos destacan un gran número de patentes relacionadas con la optimización de partes de las escaleras y pasillos mecánicos (flexibilización de la contrahuella [19], longitud variable de la cadena de accionamiento [20], disminución de espacio en el volteo [21], etc.).

Poco después del año 2000 destaca la solicitud de patentes [22] [23] en las que se hace modular la escalera mecánica pudiendo recorrer espacios tridimensionales, aumentando las posibilidades que tenían las denominadas anteriormente "paternoster". Siguiendo la línea de eliminar el atrapamiento del usuario entre el peldaño y el zócalo, un nuevo diseño de zócalo móvil [24] vuelve a aparecer integrado en un diseño nuevo de escalera mecánica a comienzos del siglo XXI.

La tendencia en cuanto a seguridad representada por el zócalo móvil, vuelve a aparecer 10 años más tarde en un diseño innovador y completo de una escalera mecánica [25] que además incluye una disminución del número de guías y de eslabones de cadena respecto a la escalera mecánica clásica, buscando así optimizar también su coste.

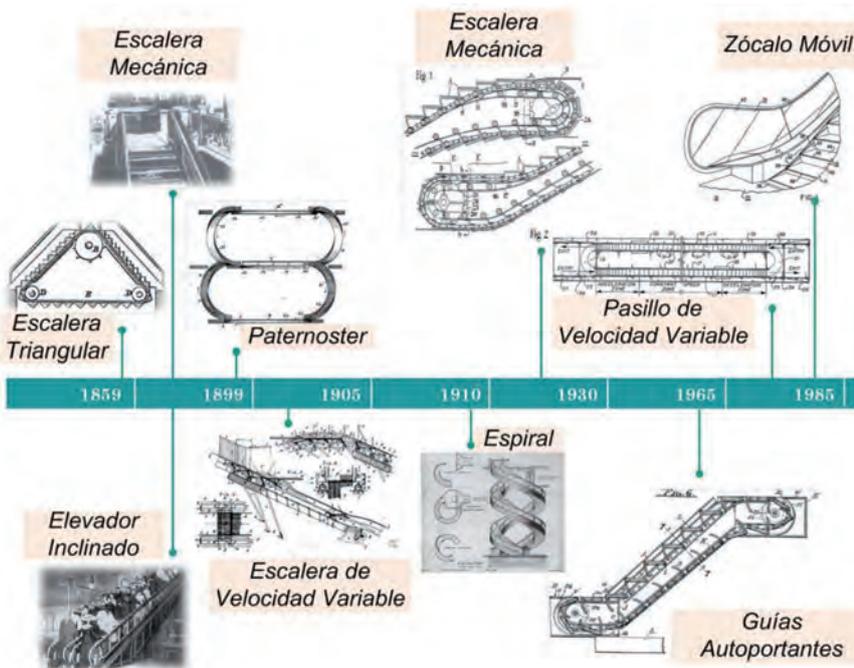


Fig. 2: Evolución de las escaleras mecánicas hasta el año 1985

innovadoras relacionadas con escaleras mecánicas principalmente y también con pasillos mecánicos debido a su similitud de funcionamiento. Estos ejes cronológicos cubrirán todos los años de historia de las escaleras mecánicas. El primero de ellos, va desde los orígenes de las escaleras mecánicas, situado en 1859, hasta el año 1985. El segundo continuará hasta el año 2010. En la Fig. 2 se recoge el primero de los ejes cronológicos.

En la introducción se han descrito los inicios relacionados con las escaleras mecánicas hasta que antes de finalizar el siglo XIX, G. Wheeler patenta una escalera mecánica [12] con peldaño que puede considerarse similar a la actual. En estos años, la forma bidimensional de las escaleras mecánicas evolucionó adoptando recorridos tridimensionales, gracias a que los peldaños no volteaban y servían tanto para subir como para bajar. Así, se patentó un tipo de escaleras mecánicas con formas innovadoras en forma de C, en espiral y las denominadas "paternoster" [13,

ras mecánicas, se hicieron mejoras que permitieron un ahorro en el transporte e instalación de las mismas, apareciendo un siglo después de los inicios, las guías autoportantes [16]. En la Fig. 2, puede observarse además que en la segunda mitad

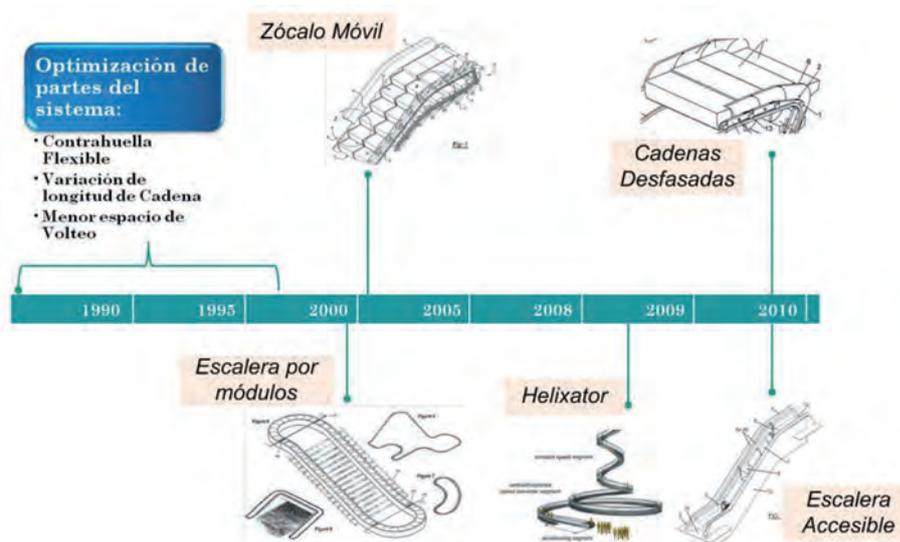


Fig. 3: Evolución de las escaleras mecánicas desde el año 1985

A continuación se muestran algunos diseños que pueden considerarse como una auto-evolución del sistema, con cambios sustanciales respecto al diseño básico y comercial de escalera mecánica, y que pretenden en general mejorar las funcionalidades y las prestaciones de este tipo de transporte, empleando la accesibilidad como requisito de diseño.

El primero que se muestra, el helixator, que data del año 2009, destaca como innovación en el campo del transporte vertical. Es un diseño de un pasillo helicoidal [26] que pretende competir con la función de un ascensor al tener mayor capacidad de carga y ser continuo.

En esta línea, junto con la búsqueda de la seguridad y sobre todo de la accesibilidad, encontramos en el año 2010 una plataforma elevadora [27], denominada en la figura *Escalera Accesible*, que gracias a la posibilidad de anidamiento entre plataformas, permite un transporte vertical accesible como un ascensor pero con una capacidad de carga mayor.

Analizando la literatura, encontramos que es realmente baja la permeabilidad existente entre las ideas patentadas y los diseños que han llegado a construirse en la realidad. La complejidad mecánica, coste inicial y de mantenimiento parecen razones suficientes como para que diseños tan innovadores como los relativos a escaleras tridimensionales (paternoster, escalera por módulos) no lleguen a ser competitivos con el diseño de escalera bidimensional tradicional. En estos diseños en los que se emplean los mismos peldaños para subir que para bajar, existe el problema adicional de la no independencia de los tramos de subida y bajada, así si un tramo debe pararse, se pararán los dos. El diseño de escalera mecánica de velocidad variable no permitiría con el mismo grado de seguridad la funcionalidad del diseño básico de poder subir o bajar andando. El uso de zócalo móvil disminuiría el riesgo de atrapamiento entre el peldaño y el zócalo actual fijo, pero aún no está técnicamente integrado para dar el mismo grado de seguridad en la zona de embarque y desembarque o zona de peines.

Otros diseños más cercanos al momento actual y que suponen un cambio sustancial del diseño básico, como son el helixator o la denominada escalera accesible, llevan poco tiempo patentados para poder valorar su permeabilidad al mundo real, aunque sí marcan un cambio de necesidades, incluyendo el ahorro de tiempo para el pasajero junto con la accesibilidad como criterio de diseño.

Destacan dos diseños innovadores que están funcionando actualmente:

Escalera mecánica en espiral. Desde las primeras patentes cerca del año 1900 [28], la idea de una escalera mecánica espiral o curvada no ha sido comercializada hasta mediados de 1980, siendo la primera escalera mecánica a la que se le ha dado un uso práctico la instalada en 1985 en Osaka (Japón). Esta escalera corresponde a un modelo de *Mitsubishi Electric Corporation*, que es la compañía que más éxito ha tenido en este tipo de escaleras. En la actualidad no son muy comunes este tipo de escaleras, una que puede verse en el Palacio Caesar en Las Vegas. En este caso, posee un claro efecto estético de esta escalera en un sitio emblemático, la funcionalidad de las mismas podría haberse conseguido mediante una combinación de escaleras o pasillos mecánicos y ascensores.

Pasillo móvil de velocidad variable. Existen pocas unidades que hayan sido instaladas. En París, en la estación de Montparnasse-Bienvenüe, se instaló un pasillo de aceleración [29] que alcanzaba los 3.35 m/s, que fue retirado a pesar de ser rediseñado para una velocidad máxima de 2.68 m/s, debido a que hubo caídas de pasajeros. En el aeropuerto de Toronto (Canadá) existe una unidad de pasillo de aceleración funcionando. La velocidad máxima de diseño es de 2m/s, y el sistema de accionamiento es completamente distinto al del metro de París. Este permite reducir el tiempo de viaje del pasajero de forma considerable.

2. CURVAS DE INNOVACIÓN Y EVOLUCIÓN

Para obtener una valoración cuantitativa sobre la evolución de las escaleras y pasillos mecánicos, se ha analizado su evolución a partir del año 1900. Para esto

ha seleccionado el número de patentes como indicador tecnológico y se ha realizado un estudio sobre las patentes relacionadas con las escaleras mecánicas y pasillos móviles [40] [41]. Los datos se han extraído de la página de la Oficina Española de Patentes y Marcas [42], que incluye más de 80 países en sus bases de datos.

Se han seleccionado 6 grupos que están directamente relacionados con escaleras y pasillos mecánicos:

1. **B66B21.** Tipos
2. **B66B23.** Componentes
3. **B66B25.** Sistemas de control.
4. **B66B27.** Condiciones de funcionamiento de escaleras mecánicas y pasillos móviles.
5. **B66B29.** Dispositivos de seguridad.
6. **B66B31.** Accesorios.

En estos 111 años aparecen unas 8500 patentes clasificadas según los grupos anteriores, un 15% de las englobadas en el grupo **B66B** (ascensores, escaleras mecánicas y pasillos móviles), cerca de 57000. Con estos valores se puede interpretar que existe un gran porcentaje de patentes relacionadas con el transporte vertical que no están relacionadas con las escaleras mecánicas y los pasillos móviles.

Se ha realizado una exhaustiva recopilación de datos de patentes entre 1900 y 2010, de cada una de los 6 tipos de patentes. La evolución de cada grupo de patentes, se ve en dos curvas. La primera curva, representada en la *Fig. 4*, corresponde al número de patentes/año de cada grupo, que mide la velocidad de creación de patentes, que da una idea de qué épocas han sido más fructíferas desde un punto de vista de la invención.

En esta curva se observa que la invención en cada grupo varía según el año de forma distinta, desmarcándose los componentes al acercarnos a la actualidad; también destaca un máximo local de casi todos los grupos entorno al año 1974.



Fig. 4: Velocidad de patentes entre 1900 y 2010

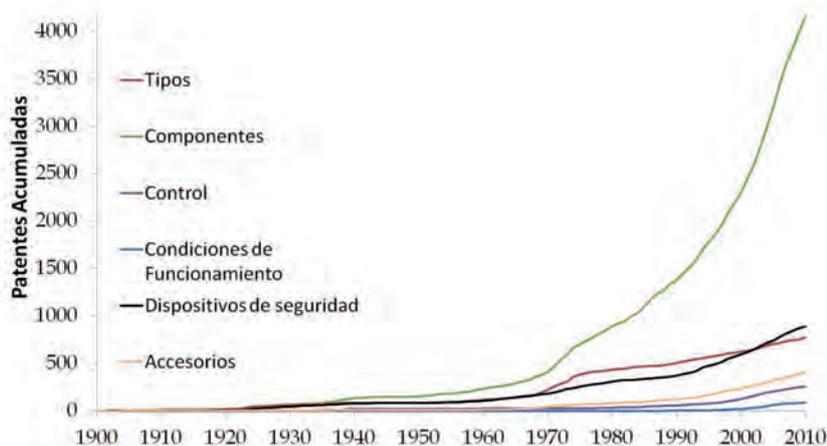


Fig. 5: Patentes acumuladas entre 1900 y 2010

Como puede observarse en la Fig. 4, en los primeros años representados hay un mayor crecimiento de los tipos de escaleras mecánicas y componentes, pasando a predominar el grupo de patentes de componentes a partir de los años '70. También se observa que en los últimos 20 años analizados existe un aumento de velocidad en el sector de los dispositivos de seguridad y en los accesorios. Las patentes relativas al control y a las condiciones de funcionamiento poseen un ligero aumento en los últimos 10 años.

En la segunda curva, se ha representado el número de patentes acumuladas desde el año 1900 hasta cada año. Esta curva puede considerarse que describe la evolución de los grupos asociados al del sistema estudiado.

En la Fig. 5 se puede observar que la curva de evolución del grupo de componentes es la que más crece desde un punto de vista de valor absoluto, alcanzando las 4000 patentes, y también es la que presenta una mayor pendiente y, por tanto,

es previsible que siga siendo el grupo que más crezca en los próximos años.

Después de analizar la Fig. 5 de forma cualitativa y valorando los estadios de evolución según se definen en la curva de la S [6] [7], se tiene que:

1. Los componentes y los accesorios se encuentran en estado de crecimiento, siendo mayor el de los componentes.
2. Los tipos de escalera mecánica siguen creciendo, pero de forma sostenida.
3. El resto, relativo a los dispositivos de control, condiciones de funcionamiento y dispositivos de seguridad se encuentran en su estado de madurez. Los dos primeros se encuentran en un estado más avanzado que el tercero.

3. ANALISIS Y CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en el análisis cualitativo y cuantitativo de patentes

puede deducirse que sí ha habido actividad inventiva en el sector de escaleras mecánicas y pasillos mecánicos, variando de forma distinta para cada uno de los grupos de patentes estudiados. En la Fig. 6 se ha representado el número de patentes acumuladas para cada uno de los grupos analizados de forma relativa y en porcentaje para cada año.

De esta figura se deduce que, en términos relativos, el grupo de componentes ha ido aumentando, a medida que han ido decreciendo los grupos de tipos de escaleras y pasillos mecánicos y de dispositivos de seguridad. También puede observarse que en los comienzos de este periodo de estudio casi no estaban presentes los accesorios y no lo estaban los dispositivos de control. Los accesorios aumentan con el tiempo su importancia mientras que los dispositivos de control aparecen y se mantienen en un porcentaje bajo y bastante constante. Los dispositivos de seguridad siempre han presentado una importancia considerable, aunque disminuye su importancia relativa hasta hacerse prácticamente constante en más del 10%. También podría destacarse que el grueso del 70% lo cubren casi de forma constante la suma de los grupos de tipos y componentes.

Si analizamos el número total de patentes, fijándonos en los datos de 2010, el mayor número de patentes corresponde al grupo de *Componentes de escaleras mecánicas y pasillos móviles*. Después, con casi 4 veces menos de importancia, le siguen los dispositivos de seguridad y, algo más retrasado, los tipos de escaleras mecánicas y pasillos móviles. Los otros tres, apenas suponen el 12% del total.

Así, este sistema de transporte vertical, está convirtiéndose en un producto *commodity*, que son aquellos que, entre distintos fabricantes, solo se diferencian en el precio. El grado de evolución del diseño, si se toma como indicador tecnológico las patentes (cualitativa y cuantitativamente) de este sector, es muy distinto a la curva de evolución del diseño empleado en la realidad, que lleva más de 100 años estancado. Podemos decir, así, que los diagramas correspondientes a las patentes e innovaciones, según la representación de Basberg [1], poseen un conjunto común muy pequeño después de 150 años. Esto supone que la mayoría de las invenciones, que han sido registradas como patentes, no han llegado a comercializarse, es decir, no son innovadoras.

De esta falta de correlación entre las invenciones existentes y las comercializadas puede deducirse que las invenciones

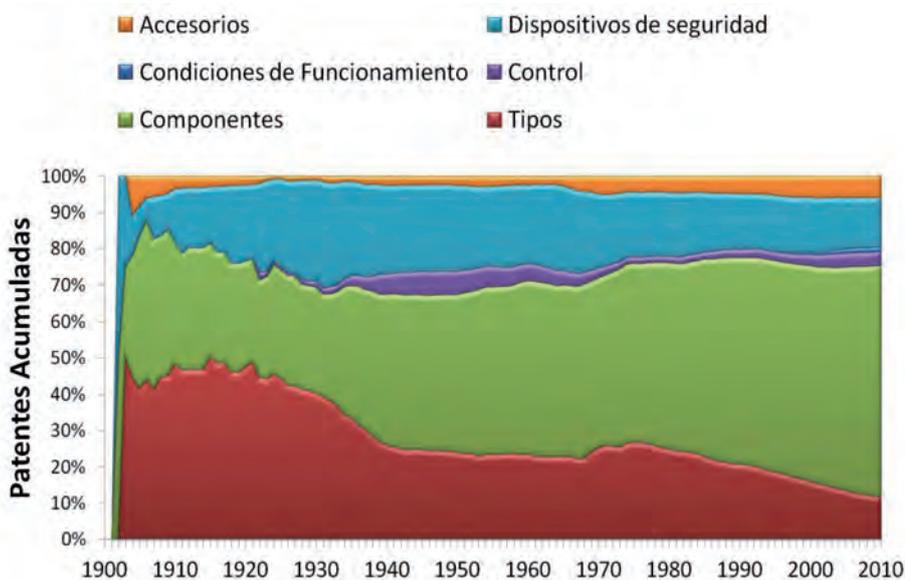


Fig. 6: Porcentaje relativo de patentes acumuladas por grupos

de las patentes relativas a escaleras mecánicas analizadas no superan los requisitos de diseño necesarios, desde un punto de vista comercial o de explotación del producto.

Para poder enfrentarse al reto de la búsqueda de la innovación radical en un sector con escasa evolución o permeabilidad entre la teoría y el mundo real, los autores proponen dos líneas principales [30]:

- Empleo de técnicas de creatividad para automatizar el proceso de generación de ideas (e.g. *brainstorming*, TRIZ), así como de métodos para la valoración objetiva de las ideas generadas (e.g. matrices de decisión).
- Empleo de técnicas de simulación para la comprobación de diseños nuevos, análisis de diseños existentes y como vía para la optimización, evitando el coste que suponen estas tareas con prototipos reales.

PARA SABER MÁS

[1] Basberg B.L. "Patents and the Measurement of Technological Change: A Survey of the Literature". *Research Policy*. 1987. Vol. 16-2, p.131-141.

[2] Pavitt K. "Uses and Abuses of Patent Statistics". En: van Raan A.F.J. (ed). *Handbook of Quantitative Studies of Science and Technology*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1988. p. 509-536.

[3] Schmookler J. *Invention and economic growth*. Cambridge: Harvard University Press, 1966. 332p. ISBN: 978-06-744-6400-1.

[4] Altshuller G. *Introducción a la innovación sistemática: TRIZ (de pronto apareció el inventor)*. Vicente-Gomila J.M. (trad.). Valencia: Internet Global, 1997. 294 p. ISBN: 84-605-6774-5.

[5] Nieto M, Lopez F, Cruz F. "Performance analysis of technology using the S curve model: the case of digital signal processing (DSP) technologies". *Technovation*. Enero 1998. Vol. 18-6, p. 439-457.

[6] Ames N. *Revolving Stairways*. Estados Unidos. US25076-A. 1859-08-09.

[7] Miravete A, Larrodé E. "Escaleras Mecánicas y Andenes Móviles". *Elevadores: Principios e Innovaciones*. España: Servicio de Publicaciones, Centro Politécnico Superior. Universidad de Zaragoza, 2007. p. 285-383.

[8] For escalators and More [en línea]. Disponible en Web: <http://www.escalate.co.uk/History_of_Escalators.htm>. [Consulta: 12 de Febrero de 2013].

[9] Wikipedia. The Free Encyclopedia [en línea]. Disponible en Web: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Escalator>>. [Consulta: 10 de Febrero de 2013].

[10] Souder L. *Escalier Mobile*. Francia. FR330546.

1903-08-20.

[11] Seeberger ChD. *Aufzug mit endloser, spiralförmiger Transportbahn*. Chicago. AT2031-B. 1900-08-25.

[12] Wheeler GA. *Elevator*. Estados Unidos. US682513-A. 1901-09-10.

[13] ANCIENS ETS GROSSELIN. *Moving staircase of the ascending and descending type*. Inventores: Hocquart E, Hugoniot E.. Estados Unidos. US1668644. 1928-05-08.

[14] Ratcliffe AB, Yorath LW. *Improvements in Passenger Elevators and Conveyors*. Reino Unido. GB190218504.1903-07-02.

[15] OTIS ELEVATOR CO. *Improvements in and relating to escalators and endless conveyors of the step or section type*. GB186347. 1923-10-11.

[16] Coryell F. *Portable escalator*. Estados Unidos. US3033340. 1962-05-08.

[17] BOEING CO. *Accelerating and decelerating moving walkway*. Inventores: Dunstan PE, Shapiro S. Estados Unidos. US3939959. 1976-02-24.

[18] RHEINSTAHL EGGERS-KEHRHAHN GMBH. *Escalator step of step belt - limiting walls projecting upwards beyond foot plates are pivot supported and are raised and lowered according to step movement*. Inventor: Heinz-Schwerdtfeger K. Alemania. DE2346266. 1975-03-20.

[19] Minoru T. Japón. JP1242389. 1988.

[20] OTIS ELEVATOR CO. *Escalator with vertical planar step risers and constant horizontal velocity*. Inventor: Sansevero FM. Europa. EP0424209-B2. 1991-04-21.

[21] TOSHIBA KK. *Passenger conveyor apparatus*. Inventores: Hirai M, Ogimura Y, Hara K et al. Europa. EP1095896-B1. 2001-05-02.

[22] Levy JC, LEVYTATOR LIMITED. *Escalator for negotiating curves*. Inventor: Levy JD. Estados Unidos. US6899216-B2. 2001-12-05.

[23] Grimm F, Timokhov A. *Escalator installation has endless conveyance surface for upwards and downwards movement and comprises horizontal and inclined sections together with individual step*. Alemania. DE10055982-A1. 2002-06-13.

[24] OTIS ELEVATOR CO. *Escalator with Step Flange*. Inventores: Hauer U, Stuffel A, Ostermeier J et al. WIPO. WO0244071.2002-06-06.

[25] THYSSENKRUPP ELEVATOR INNOVATION CENTER SA, THYSSENKRUPP ELEVATOR ES/PBB GmbH. *Escalera mecánica*. Inventores: Cabanellas-Becerra JM, Cano-Moreno JD, Gonzalez-Aleman MA et al. España. ES2319082-B1. 2010-03-16.

[26] *Future of Transportation* [en línea]. Disponible en Web: <<http://helixator.wordpress.com/>>. [Consulta 16 de Enero de 2013]

[27] THYSSENKRUPP ELEVATOR INNOVATION CENTER SA. *Sistema de transporte para pasajeros/mercancías*. Inventores: González-

Fernández E, Ros-Zuazua P, González-Aleman MA et al. España. ES2353289-B1. 2011-03-01.

[28] Souder LG. "Improvements in Movable Spiral Stairways or Elevators". Estados Unidos. GB190306796.1903-05-14.

[29] The Transport Politic [en línea]. Disponible en Web: <<http://www.thetransportpolitic.com/2009/05/21/paris-experimental-high-speed-moving-walkway-is-abandoned/>>. [Consulta 25 de Enero de 2013].

[30] Cano-Moreno JD. *Metodología para la modelización, validación, y diseño innovador de los sistemas multicuerpo del transporte vertical de personas*. Alicante: 3CIENCIAS, 2013. 286p. ISBN: 978-84-940352-6-5

MATERIAL SUPLEMENTARIO

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/8036-1.pdf



Arquitectura interactiva de modelado para educación y entretenimiento en museos

An interactive modelling architecture for education and entertainment at museums

Andrés A. Navarro-Newball¹, Isidro Moreno-Sánchez², Ali Arya³, Edmond C. Prakash⁴, Efetobore Mike-Ifeta⁵, Juan D. Mejía Mena⁶

¹ Pontificia Universidad Javeriana (Colombia)

² Universidad Complutense de Madrid (España)

³ Carleton University (Canada)

⁴ University of Westminster (Reino Unido)

⁵ Carleton University (Canada)

⁶ Pontificia Universidad Javeriana (Colombia)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8058>

El papel social de los museos ha cambiado drásticamente en la última década [1]. Los museos ya no se ajustan al modelo decimonónico de narrativa lineal cerrada; hoy se buscan experiencias interactivas abiertas [2]. La interactividad se está haciendo imprescindible debido a, entre otras cosas, los inmensos beneficios para el aprendizaje que proporciona la participación de las personas y también para la promoción del propio museo. Los museos brindan a los visitantes la oportunidad de conectar conceptos a objetos y a situaciones concretas [3]. Tradicionalmente, los visitantes observaban piezas expuestas

detrás de un vidrio que alejaba cualquier experiencia educativa. Nuestro modelo interactivo para museos (MOMU) pretende apoyar contenidos culturales complejos utilizando herramientas que favorezcan el aprendizaje y el entretenimiento.

La tecnología eleva el interés y permite la creación de experiencias que transformen a los visitantes [4]. Sin embargo, la tecnología en museos está frecuentemente desligada del discurso general y no existe una coherencia entre los sistemas interactivos; los desarrollos tecnológicos en los museos pueden ser intrusivos [5] y/o rígidos [6].

MOMU pretende proporcionar herramientas para crear experiencias ludo-educativas mejorando la flexibilidad del museo independientemente de la tecnología y procurando que no sean disruptivas con las obras expuestas. Nuestro enfoque es cercano al de White et al. [7], las principales diferencias son:

- MOMU proporciona contenidos a experiencias *in situ*, virtuales, móviles y físicas.

- Los conceptos subyacentes a la investigación constituyen (1) un nuevo enfoque para la experiencia del museo orientada hacia una narrativa interactiva personalizable, donde un curador o comisario propone una narrativa abierta y el visitante se apropia de ella creando su propia historia (2); el contexto social en que esa experiencia se lleva a cabo y (3) el uso de varias tecnologías interactivas facilitan la inmersión.
- La elección de la tecnología utilizada quedará en manos del usuario del sistema. Por ejemplo, un profesor de secundaria decidirá de qué manera desea presentar un concepto determinado.
- Un gran desafío es proponer un modelo computacional para permitir la representación e introducción de las tareas cognitivas a las exposiciones. En el ejemplo del maestro de secundaria, éste necesita lograr objetivos educativos particulares en el recorrido. Así, el profesor debe ser capaz de relacionarse no sólo con la tecnología y los conceptos, sino también con las tareas cognitivas.
- Proponemos la creación de herramientas para facilitar la creación y clasificación de contenidos 3D para proporcionar los modelos virtuales requeridos en los escenarios virtuales.

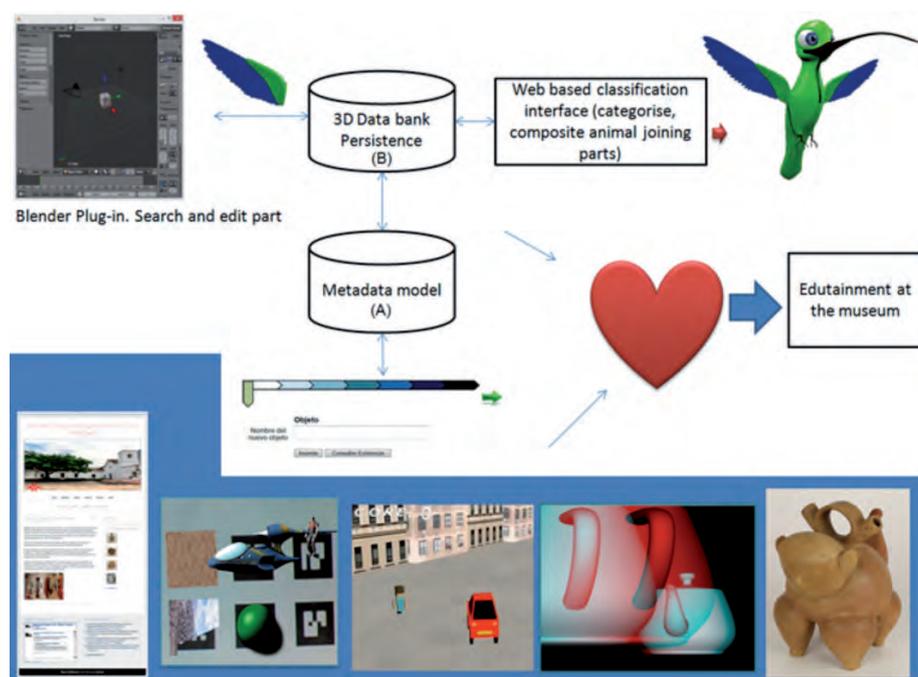


Fig. 1: Arquitectura del sistema. El sistema de gestión de contenidos (A) se relaciona con objetos reales, documentos, modelos virtuales (B) y tecnologías interactivas (región azul) para crear una experiencia ludo-educativa en el museo

1. MATERIALES Y MÉTODOS

Se observaron los comportamientos de visitantes y se analizaron exposiciones, y se realizó un estudio de públicos en diferentes museos del mundo en exposiciones con y sin tecnología. La muestra de museos refleja la diversidad de la museografía contemporánea en cuanto a temática (arte, arqueología, ciencias, historia), localización (Colombia, España, Canadá, Reino Unido, Francia) y tipos de museografía en relación a las TIC (interactiva, digital, no digital). Nuestra metodología interdisciplinaria considera el análisis cognitivo de tareas y el estudio de los problemas y soluciones innovadoras. Esta es una notable diferencia con otros enfoques y busca asegurar que las herramientas implantadas como apoyo de los contenidos educativos proporcionen información co-

herente a las necesidades del museo y a los intereses de los visitantes [8].

Nuestro modelo (Figura 1A) permite la introducción de objetos en la colección del museo y la introducción de nuevas colecciones. Este será el punto de partida de un usuario para crear una experiencia de aprendizaje satisfactoria. El Banco de datos debe almacenar narrativas, información y documentos asociados a los objetos y colecciones. MOMU proporciona una herramienta de creación 3D (Figura 1B). La herramienta incluye un banco de datos 3D y editores para facilitar la construcción de los personajes virtuales necesarios en el desarrollo de entornos interactivos. Este será el segundo paso para un usuario que crea una experiencia. Una vez reconocida la necesidad de modelos virtuales, el usuario puede buscar en el banco de datos gráficos modelos ya realizados. Las tecnologías de interacción deben ser asociadas con los objetos y las colecciones. Un conjunto de tecnologías de entrada (de izquierda a derecha, azul región de fondo en la Figura 1) que puede incluir la Web 2.0 (redes sociales), la realidad aumentada (AR), los videojuegos, la realidad virtual y los objetos del museo real para facilitar la interacción.

El corazón del sistema permite la creación de experiencias según las necesidades (obtenidas de la observación). Éste está en desarrollo y requiere: (1) mejorar el modelo actual para integrar de una manera natural tecnologías y elementos; (2) representar computacionalmente principios cognoscitivos asociados con objetos reales, colecciones y recorridos; (3) una manera de incluir información dependiente del tiempo para mejorar la narrativa; (4) una interfaz que permita crear experiencias de aprendizaje entretenidas que minimicen la programación y promuevan la reutilización de contenidos.

Para los visitantes, el sistema propuesto proporcionará tres funciones principales: planificación, dirección y comunicación. El sistema propuesto se divide en tres niveles correspondientes a las tres funciones. El primer nivel atenderá a la planificación de la visita, actuando como la primera experiencia para el usuario. Estará disponible en línea, en dispositivos móviles y en el museo a través de kioscos interactivos. Los planes de la visita se guardarán en el perfil del usuario y se podrá acceder a ellos y editarlos en todo momento mediante cualquier dispositivo. El segundo nivel prestará orientación sobre rutas por el espacio cultural. Este nivel presentará una combinación de AR, centros de exhibición y el uso interactivo

de espacios físicos como suelos y paredes que faciliten la interacción por gestos mimético-naturales. Los centros de exhibición, ubicados en puntos clave del museo, serán una extensión del primer nivel. Esta integración de planificación y orientación también permitirá a los usuarios agregar elementos como fotos, etiquetas y comentarios al itinerario. El nivel final proporcionará al usuario la capacidad de conectarse e interactuar con otros visitantes.

2. TECNOLOGÍAS DE INTERACCIÓN DE BAJO COSTE

En ocasiones los elementos de interacción en los museos se rompen o se pierden; además, no se pueden llevar a casa para seguir interactuando. Una posible solución es utilizar suelos y dispositivos de interacción por gestos que no requieren contacto físico y un simple folleto de papel para llevar a casa con códigos para recrear la experiencia interactiva. Los libros de AR son una interfaz móvil económica basada en papel; el Kinect es un dispositivo que no requiere contacto y que trae propiedades tangibles a diversas superficies y opciones de rastreo del usuario en ambientes de realidad virtual (VR) y el suelo del museo, convertido en un sistema interactivo por gestos, es un dispositivo sumamente resistente. Las tecnologías de

interacción de bajo coste benefician a los museos (casi siempre escasos de recursos) y encierran un alto potencial para generar experiencias que atraigan a los visitantes.

Una interfaz tangible permite la interacción del usuario con información digital a través de la información física. "Tangibles, en forma de artefactos físicos integrados con tecnologías de sensores, ofrecen la oportunidad para explotar y construir en nuestra interacción cotidiana y experiencia con el mundo, lo que permite nuevas formas de participación y acceso a herramientas para apoyar el aprendizaje" [9, p.151]. La AR "ofrece un espacio de aprendizaje innovador mediante la fusión de materiales de aprendizaje digital en el formato de los medios con herramientas u objetos, que son parte directa del espacio físico, facilitando, por lo tanto, aprendizaje in situ" [10].

Los libros de AR mejoran la experiencia de lectura, la visualización de productos, cuentan historias y enseñan. Pueden apoyar la visualización de situaciones complejas, aumentar la comprensión y son una evolución de los libros tradicionales, el principal medio de enseñanza y aprendizaje [11] todavía hoy. El *Magic Book* [12] exploró interfaces de transición entre la realidad física, AR y VR. Se podía leer sin tecnología; además, superponía imágenes con una pantalla portátil que

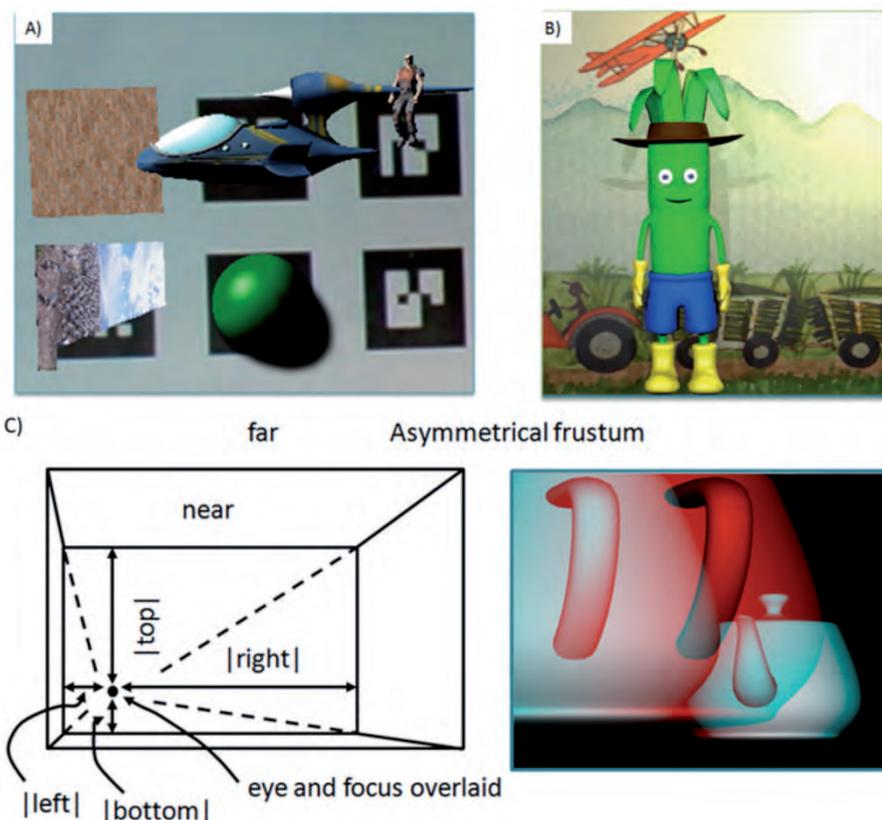


Fig. 2: Libros y folletos de AR. a) Página del libro de AR con marcadores mostrando varios tipos multimedia. b) Demostración de AR para el Museo de la Caña de Azúcar. c) Rastreo del usuario con el Kinect y la VR utilizando anaglifes. Con el sensor Kinect creamos un cono de visualización asimétrico para simular la percepción real en 3D

permitía ver escenas desde cualquier perspectiva o era posible volar en las escenas para tener una experiencia inmersiva de VR como un avatar virtual. Este libro ofrecía una interacción selectiva, permitiendo ver desde diferentes perspectivas contenidos 3D. Tradicionalmente, la creación de libros de AR es difícil pues depende de la configuración de los programas o de secuencias de comandos [11].

Con nuestro libro de AR hemos superado algunas de las dificultades de los anteriores: (1) incluir todos los tipos de datos principales como imagen estática 2D, 2D dinámica, contenido 3D y sonido (Figuras 2A y B). (2) Ofrecer una interfaz de edición de libros utilizando cuadros de diálogo, (3) ofrecer herramientas de autoría para crear páginas e introducir marcadores y sus elementos relacionados, como modelos virtuales, animaciones, videos, sonidos, imágenes y gestos; (4) explorar una forma novedosa de interacción que integra la interacción gestual del Kinect al libro, además de proyectar los objetos 3D y animaciones con rotación y traslación sincronizada en las páginas. La novedad de nuestro libro se basa en la flexibilidad para incluir tipos de datos principales (muchos libros usan un subconjunto de ellos), para crear cualquier libro basado en marcadores (muchos sistemas se desarrollan para un solo libro) y asignar gestos basados en el Kinect, como "tomar", "mover" o "zoom" a los objetos virtuales que se muestran en cada página (muchos libros utilizan tarjetas adicionales de AR para ello).

También, con el Kinect ofrecemos integración a escenarios básicos de VR. El Kinect se utiliza en entornos interactivos que proponen nuevas formas de interacción gestual [13] que añaden extensiones físicas y la tercera dimensión a la interacción con el usuario (Figura 2C). Nuestros desarrollos hacia un suelo interactivo se explican en nuestro trabajo anterior [14].

3. HERRAMIENTAS DE MODELADO

Este desarrollo surgió por la necesidad de crear animales 3D para entornos virtuales en museos e inspirado en técnicas de modelado por partes [15] y por la idea "desde el primer amanecer de la vida, todos los seres orgánicos son parecidos en grados descendentes, y pueden ser clasificados en grupos bajo grupos" [16, capítulo 13]. Nuestro modelo clasifica un componente 3D según su morfología tomando en cuenta sus parámetros. Los parámetros consideran cinemática, topología, espacio y características de visualización. Las piezas 3D almacenadas se pueden editar

para crear nuevos componentes usando un módulo de edición de *Blender* o para construir un animal completo. Frente a otros sistemas, la categorización puede realizarse por el usuario según el aspecto de la pieza y no está necesariamente ligada a la taxonomía biológica. Los objetos 3D pueden ser indexados basados en sus formas utilizando aplicaciones de recuperación basada en formas [17]. Buscando en una base de datos de mallas 3D, el usuario encuentra partes, corta las regiones de interés de las mallas y compone de diferentes maneras para formar nuevos objetos. Sin embargo, estos enfoques [18, 19] no permiten la parametrización o animación de los componentes y no consideran seres orgánicos.

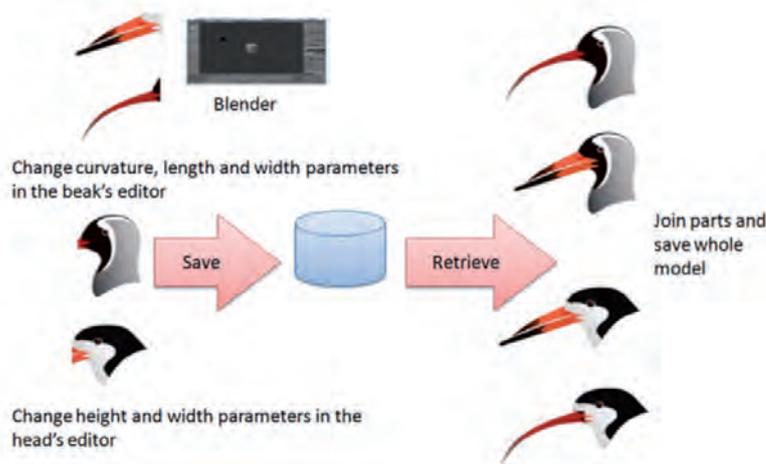


Fig. 3: Modelado por partes y persistencia utilizando parámetros y herramientas de edición

En nuestro modelo se requería una plataforma de clasificación genérica y flexible que permitiera al usuario definir su propia subdivisión y los parámetros. Por ejemplo (Figura 3), utilizando un módulo, alteramos el pico de un ave en cuanto a su curvatura, longitud y anchura. Usando otro módulo, alteramos la cabeza de un pájaro en cuanto a su altura y anchura. Los nuevos subcomponentes pueden ser almacenados en un banco de datos gráficos u obtenidos de la base de datos para crear uno nuevo. Una vez tenemos los componentes, recuperamos un conjunto de ellos para crear un modelo animal completo que se almacena en la base de datos. El banco de datos gráfico almacena cualquier modelo y submodelo con sus parámetros. Logramos esto implementando un modelo de base de datos. Un animal real se asocia a un animal virtual. El usuario puede seleccionar, editar o crear una parte virtual. Entonces, el usuario puede alterar o definir nuevos parámetros. Una vez que el animal está completo, el usuario pue-

de almacenarlo como un animal virtual completo. El modelo apoya la definición de cualquier parámetro y su inserción con un comando SQL. También, permite hacer referencia a las estructuras de una parte, como una malla 3D, para ser almacenada como un atributo. Aprovechando la última característica, el usuario tiene la opción de almacenar información compleja como el esqueleto de animación cinemática.

Nuestro primer módulo permite crear formas de extremidades animales junto con su esqueleto de animación. El editor se basa en un modelo matemático que utiliza *Metaballs* organizadas a lo largo de curvas Bézier y una GUI permite la introducción de los parámetros. Las *Metaballs* se obtienen de la adición de las esferas

que parametrizan la fusión de las mismas. La idea es definir un campo de atracción de cada *Metaball* que se relaciona con su radio de influencia. La atracción entre varias esferas alineadas crea un tubo como forma adecuada para las extremidades (Figura 4A). Otras formas, como la palma de la mano (Figuras 4B y D), pueden obtenerse organizando la interacción de las *Metaballs* de manera diferente (por ejemplo, a lo largo de una elipse). El camino tubular de *Metaballs* puede definirse mediante curvas de Bézier. Una vez que se ha creado la forma de la pierna/brazo básico, ésta puede modificarse utilizando la GUI (Figura 4C). El usuario puede modificar parámetros como la curvatura, orientación de las piezas con respecto a una con la otra y finalmente asignar un esqueleto de animación, guardar el modelo en el editor y realizar una consulta de inserción para el banco de datos. El esqueleto de animación se crea automáticamente una vez terminada la forma de la extremidad. El algoritmo combina las *Metaballs* y crea

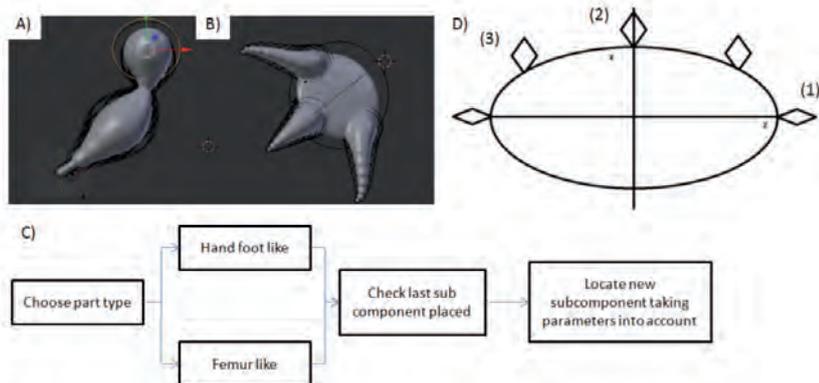


Fig. 4: Editor de extremidades. a) Forma tubular con Metaballs utilizando diferentes radios a lo largo de la ruta. b) pie usando curvas de Bézier para los dedos y una elipse para la palma. c) Flujo de trabajo para la construcción de una extremidad. d) Distribución de los dedos del pie de un primate

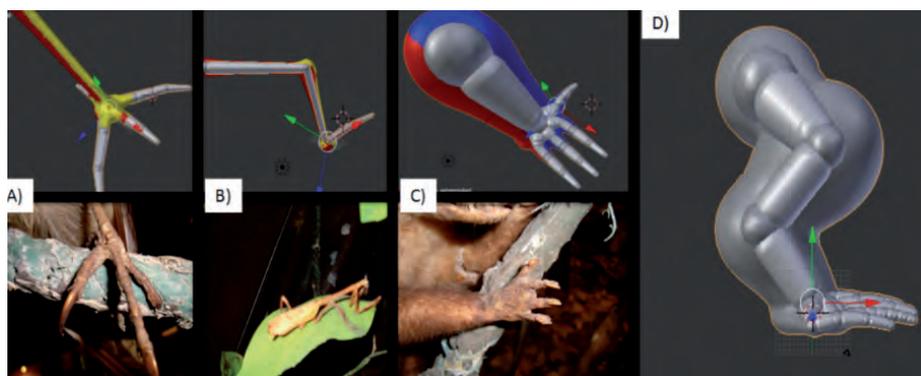


Fig. 5: Extremidad generada en módulo de Blender. a) aves. b) insectos. c) mamíferos. d) miembro de primate con su esqueleto

una malla poligonal. En esta etapa, se colocan los huesos en cada subcomponente del miembro (Figura 5D). Así, recreamos las extremidades de animales del bosque seco (Figuras 5A, B y C).

4. MANEJO DE CONTENIDOS

El modelo de gestión de contenidos proporciona una herramienta flexible para la creación de contenidos y narrativas para entretener y educar en los museos. Hemos seguido el enfoque de colaboración humana [20] permitiendo a los usuarios crear y complementar sus clasificaciones. La Figura 6 muestra las entidades que apoyan el modelo. El elemento más importante en un museo es el objeto (es decir, la pieza de una exposición). Todos los objetos del museo pertenecen a una colección. Ambos, objetos y colecciones tienen acontecimientos históricos en el Museo (historia). También, pueden tener una o varias ubicaciones. Por ejemplo, el lugar donde fue encontrado el objeto o el lugar donde se guarda el objeto. Una persona puede ser responsable de una colección o pudo encontrar un objeto (personas). Por último, colecciones y objetos pueden tener asociadas características

tales como tamaño, color o textura (entre otros) o documentos tales como fotografías, mallas 3D, multimedia, documentos.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Hemos descrito nuestros avances hacia un modelo para la generación de contenido

educativos en museos, proporcionando algunas ideas sobre cómo el sistema debe ser flexible y no intrusivo. Algunas partes de esta arquitectura son todavía conceptuales y requieren más desarrollo (especialmente aspectos de la integración de alto nivel de las herramientas). Nuestros principales avances incluyen: un libro de AR, un entorno de VR preliminar, una herramienta de modelado 3D y un sistema de gestión de contenidos. Mobiliario, señalización, cartelería, sistemas basados en tecnologías y objetos de la exposición no necesitan ser descartados, incluso cuando son específicos de una temática y no se puede cambiar. El objetivo final de MOMU (el corazón en la Figura 1) es crear una herramienta capaz de integrar lo que se desea crear, una experiencia educativa y divertida particular. Por ejemplo, hemos podido crear experiencias de entretenimiento inspiradas en historias de museos, exposiciones o escenarios [21] que podrían integrarse con MOMU.

Con nuestro libro de AR, hemos sido capaces de: (1) incluir todos los tipos de datos principales; (2) ofrecer una interfaz de edición basada en cuadros de diálogo; (3) ofrecer herramientas de autoría para crear páginas e introducir marcadores relacionados con elementos tales como: maquetas virtuales, animaciones, vídeos, sonidos, imágenes y gestos basados en Kinect para crear cualquier libro. Tenemos que mejorar el libro proporcionando interacción sin marcadores y proporcionando páginas donde el visitante pueda crear contenido nuevo.

Tomamos como condición previa que un conjunto de componentes animales puede ser clasificado y almacenado y luego los componentes se pueden juntar para

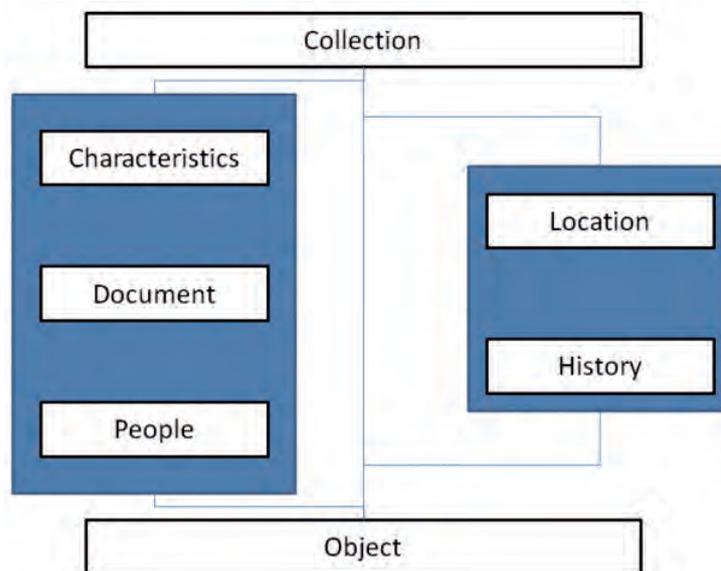


Fig. 6: Entidades en el modelo

crear un nuevo animal. Nuestro objetivo es facilitar la creación por parte de no expertos a través de un conjunto de parámetros apoyado por un modelo matemático y una clasificación gráfica que sigue una morfología definida por el usuario. Estas características traen oportunidades tales como la definición de distintas taxonomías morfológicas consistentes con el conocimiento anatómico del usuario. El banco de datos gráfico es flexible y permite la inclusión de cualquier parte con sus parámetros, pero los parámetros definidos en los módulos de Blender no son dinámicos. Se espera tener al menos los siguientes módulos: cuerpo, cabeza, ojos, oídos, boca, pico, alas y colas, para crear animales completos rápidamente.

Hemos creado una base de datos capaz de almacenar toda la información y documentos relacionados con los objetos y colecciones. Sin embargo, todavía no hemos logrado una flexibilidad total y la máxima integración en el modelo. Aunque creemos que la programación y evolución del modelo existirá siempre, esperamos que en el futuro todos los componentes del modelo faciliten el trabajo del equipo interdisciplinar para construir una experiencia de aprendizaje y entretenimiento.

PARA SABER MÁS

- [1] Russo A, Watkins J, Kelly L, Chan S. "Social interaction and cultural interaction in museums." *Nordisk Museologi*. 2007. Vol. 1. p.19-29. <http://www.nordiskmuseologi.org/English/ANGELINA%20RUSSO.pdf>
- [2] Russo A, Watkins J, Kelly L, Chan S. "How will social media affect museum communication?" *Nordic Digital Excellence in Museums conference (NODEM 06)*, 2006. <http://eprints.qut.edu.au/6067/>
- [3] Clegg T, Gardner C, Williams O, Kolodner J. "Promoting Learning in Informal Learning Environments". S. Barab, K. Hay, & D. Hickey (Eds.), *Proceedings of the seventh International Conference of the Learning Sciences*, 2006. p. 92-98.
- [4] Ciolfi L, Bannon L, Fernström M. "Including visitor contributions in cultural heritage installations: Designing for participation". *Museum Management and Curatorship*, May 2008. Vol 23-4, p.353-365. doi:10.1080/09647770802517399.
- [5] Hall T, Bannon L. "Designing ubiquitous computing to enhance children's interaction in museums." *Proceedings of the 2005 conference on Interaction design and children (IDC '05)*. ACM, New York, NY, USA, 2005. p.62-69. doi: <http://dx.doi.org/10.1145/1109540.1109549>.
- [6] Styliaras GD. "A web-based presentation framework for museums." *Proceedings of the 2007 Euro American conference on Telematics and information systems (EATIS '07)*. ACM, New York, NY, USA, 2007. Article 13, 8 pages. doi: <http://dx.doi.org/10.1145/1352694.1352708>.
- [7] White M, Mourkoussis N, Darcy J, Petridis P,

- Liarokapis F, Lister P, Walczak K, Wojciechowski R, Cellary W, Chmielewski J, Stawniak M, Wiza W, Patel M, Stevenson J, Manley J, Giorgini F, Sayd, P, Gaspard F. "ARCO: An Architecture for Digitization, Management and Presentation of Virtual Exhibitions. In *Proceedings of the Computer Graphics International (CGI '04)*." IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, 2004. p.622-625. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/CGI.2004.16>.
- [8] Ochoa-Angrino S, Aguilar-Zambrano J, Jaramillo A, Henao L. "Triz y análisis cognitivo de tareas en el diseño de escenarios de aprendizaje para museos." *Memorias de II Conferencia Internacional de Integracao de Design, Engenharia e Gestao para a inovacao*, 2012.
- [9] Price S. "A representation approach to conceptualizing tangible learning environments." *Proceedings of the 2nd international conference on Tangible and embedded interaction (TEI '08)*. ACM, New York, NY, USA, 2008. p-151-158. doi: <http://dx.doi.org/10.1145/1347390.1347425>.
- [10] Wang X. "Augmented Reality: A new way of augmented learning." *eLearn 2012*, 10 pages. doi: <http://dx.doi.org/10.1145/2380716.2380717>.
- [11] Do TV, Lee JW. "Creating 3D E-books with ARBookCreator". *Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE '09)*. ACM, New York, NY, USA, 2009. p.429-430. doi: <http://dx.doi.org/10.1145/1690388.1690484>.
- [12] Billingham M, Kato H, Poupyrev I. "The MagicBook - moving seamlessly between reality and virtuality". *IEEE Computer Graphics and Applications*, May/June 2001. Vol. 21-3, p. 6-8. doi: 10.1109/38.920621.
- [13] Francese R, Passero I, Tortora G. "Wiimote and Kinect: gestural user interfaces add a natural third dimension to HCI". *Proceedings of the International Working Conference on Advanced Visual Interfaces (AVI '12)*, Genny Tortora, Stefano Levialdi, and Maurizio Tucci (Eds.). ACM, New York, NY, USA, 2012. p.116-123. doi: <http://dx.doi.org/10.1145/2254556.2254580>.
- [14] Christian C. Ventes, Andrés A. Navarro-Newball, Deivy A. Velasco, Edmond C. Prakash. "A Programming Library for Creating Tangible User Interfaces." *GSTF Journal on Computing (JoC) Vol.4 No.1*, 23-32, 2014 ISSN: 2251-3043 DOI: 10.5176/2251-3043_4.1.304.
- [15] Katz S, Tal A. "Hierarchical mesh decomposition using fuzzy clustering and cuts." *ACM Trans. Graph.* July 2003. Vol. 22-3. p.954-961. doi: <http://dx.doi.org/10.1145/882262.882369>.
- [16] Darwin C. "On the Origin of Species: By Means of Natural Selection Or the Preservation of Favored Races in the Struggle for Life". *Cosimo classics science*. Cosimo. 2007. ISBN10: 1602061440.
- [17] Funkhouser T, Kazhdan M. "Shape-based retrieval and analysis of 3D models." *ACM SIGGRAPH 2004 Course Notes (SIGGRAPH '04)*. ACM, New York, NY, USA, 2004. Article 16. doi: <http://dx.doi.org/10.1145/1103900.1103916>.
- [18] Jain A, Thormhlen T, Ritschel T, Seidel H. "Exploring Shape Variations by 3D-Model Decomposition and Part-based Recombination." *Computer Graphics*

Forum, 2012. Vol.31-2. p.631-640. doi: 10.1111/j.1467-8659.2012.03042.x.

- [19] Akimoto T, Ogata, T. "Towards an Integrated Narrative Generation System Based on Structural Techniques and Generation Control". *Digital Game and Intelligent Toy Enhanced Learning (DIGITEL)*, 2012 IEEE Fourth International Conference on, Takamatsu, 2012, p. 174-176. doi: 10.1109/DIGITEL.2012.50.
- [20] Farrimond B, Presland S, Bonar-Law J, Pogson F. "Making History Happen: Spatiotemporal Data Visualization for Historians." *Computer Modeling and Simulation*, 2008. EMS '08. Second UKSIM European Symposium on, Liverpool, 2008, p. 424-429. doi: 10.1109/EMS.2008.42.
- [21] A.A. Navarro Newball, I. Moreno Sánchez, E. Prakash, Ali Arya, V.E. Contreras Roldán, V.A. Quiceno Rios, J.D. Mejía Mena, D.F. Loaliza, S. Lozano P.; "Gesture based human motion and game principles to aid understanding of science and cultural practices". *Multimedia Tools And Applications* ISSN: 1380-7501: Springer, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/s11042-015-2667-5>.

AGRADECIMIENTOS

Canadian Museum of Science and Technology y Aviation Museum, Ottawa; INCIVA – Instituto para la Investigación y Preservación del Patrimonio Cultural y Natural del Valle del Cauca, Cali; Museo de América, Madrid.

Gestión de las relaciones con el cliente (CRM) y BIG DATA: una aproximación conceptual y su influencia sobre el valor de los datos aplicados a la estrategia de venta

Customer relationship management (CRM) and BIG DATA: a conceptual approach and their impact over the power of data applied to selling strategies

■■■■
Cristina Gallego-Gómez¹ y Carmen de-Pablos-Heredero²

¹ EAE Business School (España)

² Universidad Rey Juan Carlos (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8071>

Hoy en día, las empresas manejan grandes cantidades de datos que son necesarios de gestionar para convertirlos en información, y por ende, en conocimiento y poder actuar en base a los mismos. Todo ello, es el resultado de conocimiento generado y derivado del trato con los clientes, proveedores, empleados, etc. en sus iteraciones con las compañías. Es imprescindible gestionar dicha información en todas las organizaciones para mantener y formular las estrategias.

En un entorno altamente competitivo, tiene mayor importancia el conocimiento del cliente que viene derivado y clasificado principalmente por sistemas de información. Estos son implantados en las organizaciones con el fin de proporcionar información de interés, asegurando la calidad y veracidad de la misma, en el momento oportuno.

Son múltiples las necesidades de información que pueden manifestarse en las empresas y requieren de consultas sobre diversos temas, para el óptimo desempeño de las funciones. Es un hecho que las organizaciones necesitan de la información como un activo indispensable para la consecución de sus objetivos, porque a partir de la misma pueden obtenerse, entre otras cosas, ventajas competitivas de su entorno (Aportela & Gallego, 2015).

La información se constituye como una herramienta indispensable en la toma de decisiones por parte de los mandos altos e intermedios. De Pablos et al. (2012) estiman que más del 80% del tiempo total de trabajo de los directivos de una

empresa, está dedicado al proceso de la información.

En base a esto, debe señalarse que no hay que confundir el sistema de información con el sistema informático, ya que este último es una parte del sistema de información general.

Por tanto, los CRMs y el Big Data son sistemas informáticos que están principalmente orientados como sistemas de soporte a la decisión, ya que se utilizan con frecuencia como fuerza de ventas y se orientan a campañas de marketing. Aunque el Big Data sea un concepto mucho más amplio, cuyo último fin es constituir una fortaleza para las compañías que explotan, porque su correcto uso ayuda a mejorar la eficiencia y eficacia.

Teniendo en cuenta esta realidad, el presente artículo tiene como objetivo constituir una aproximación a través de literatura especializada para estudiar la evolución tanto de los CRMs, como antesala del del Big Data, y la relación entre ambos como elementos estratégicos dentro de las compañías. En un primer momento, se realiza una aproximación a los conceptos y a continuación se describe el estado del arte sobre el tema. Se esbozan las características más representativas tanto de los CRMs como del Big Data.

Por último, se explica la relación entre ambos sistemas para analizar sus rasgos complementarios, lo cual constituye el propósito para analizar la evolución de estos sistemas de información y la forma en que las empresas lo explotan en la actualidad.

Es interesante mostrar la evolución de los sistemas de explotación de datos en las empresas, ya que se requieren para permitir la toma de decisiones estratégicas. Los sistemas CRMs conviven hoy en día con los sistemas que explotan grandes cantidades de datos. Por tanto, es conve-

niente ofrecer una aproximación del efecto de ambos sistemas en su contribución, como elementos clave, que ayudan en la toma de decisiones estratégicas en las empresas.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. MATERIAL Y MÉTODOS

El presente trabajo se ha sustentado en una investigación documental que "consiste en un análisis de la información escrita sobre un determinado tema, con el propósito de establecer relaciones, diferencias, etapas, posturas o estado actual del conocimiento respecto al tema objeto de estudio" (Bernal, 2006). Por lo que fue utilizada como vía de obtención y análisis de los datos procedentes de fuentes documentales a fin de profundizar en el tema desde la perspectiva teórica.

La revisión a la bibliografía realizada pertenece a una investigación exploratoria más amplia que actualmente se encuentra en curso con el objetivo de poner de manifiesto el papel estratégico que juegan los sistemas de información y los datos dentro de las empresas.

Las principales fuentes de información empleadas han sido las bases de datos especializadas. Para poder encontrar información de calidad este trabajo ha utilizado las siguientes: ABI/Inform y Ecolint. Además del buscador especializado *Google Scholar*.

3. CUSTOMER RELATIONSHIP MANAGEMENT (CRM)

Como primera aproximación al tema, es necesario un acercamiento al concepto de forma teórica.

Respecto a esto, nos encontramos con una limitación en la literatura. Existen autores (Paas y Kuijlen, 2001) que manifiestan que no existe una definición generalmente aceptada del término *Customer Relationship Management*, en adelante CRM. Cambra-Fierro et al., (2014) apuntan que puede deberse a la diversidad de perspectivas desde las que se puede analizar el tema, que posteriormente a las definiciones ofrecidas por algunos autores, se tratarán en este trabajo.

Aun así, se sostiene que los orígenes del concepto de CRM datan de la rela-

ción con el marketing relacional. Y es precisamente, la Asociación Española de Marketing Relacional (AEMR, 2001) quien publica una definición sobre CRM como "El conjunto de estrategias de negocio, marketing, comunicación e infraestructuras tecnológicas diseñadas con el objetivo de construir una relación duradera con los clientes, identificando, comprendiendo y satisfaciendo sus necesidades".

Por su parte Gronross (1997), define el término como un proceso. Este autor, aporta una visión donde el CRM tiene un ciclo de vida con más hitos descritos que en la anterior definición, en cuanto permite *identificar, captar, satisfacer, retener y potenciar (y cuando sea necesario, terminar) relaciones rentables con los mejores clientes y otros colectivos, de manera que se logren los objetivos de las partes involucradas* (Cava, 2004).

Gummesson (2004), también hace mención en su concepto a las dos cuestiones donde concluyen las definiciones hasta ahora aportadas, teniendo en cuenta la visión de ambas, tanto de marketing como de clientes. El autor, afirma que el CRM no es más que la aplicación práctica de los valores y estrategias del marketing relacional, con especial énfasis en la relación con los clientes.

Por tanto, y en base a esto, podemos concluir, hasta el momento, que el CRM requiere una filosofía de negocio centrada en el cliente, por la cual la empresa tiene una visión de 360°, es decir que pueda obtener a través de un proceso de negocio toda la información entre las interacciones cliente-empresa y tener una visión completa (Gil-Lafuente, Luis-Bassa, 2010) que pueden ser utilizadas para estudiar el comportamiento del consumidor en una sociedad donde este, tiene el poder ya que puede comparar entre la oferta disponible para elegir la opción que más satisfaga su necesidad.

Sin embargo, y en contraposición de lo visto hasta ahora, otros autores definen la estrategia CRM afirmando que no sólo se trata de adoptar una estrategia de negocio centrada en el cliente, sino también de implementarla de tal modo que cambie la forma de trabajar de empleados y clientes para que, con el apoyo de nuevas tecnologías, se creen nuevas interacciones con nuevos procesos de trabajo.

Es el caso de Stanton, Etzel y Walker (2004) que entienden el CRM como una filosofía a largo plazo orientada a recolectar, comprender y utilizar de forma inteligente los datos del cliente, incluyendo un tratamiento particularizado de ellos a partir de esa información y ofreciendo

un alto nivel de servicio para los clientes principales; de la combinación de esas acciones se busca lograr los objetivos de incrementar la lealtad del cliente y la rentabilidad.

Por tanto, se constata que existen diferentes perspectivas en cuanto a CRM se refiere. Tomamos como referencia las aproximaciones al CRM propuestas por Day (2000), que describe tres formas de concebir el CRM, desde un punto de vista empresarial:

- *Orientada al mercado.* El CRM juega un papel central en la estrategia de la compañía, que se centra en desarrollar un servicio de valor añadido al cliente, basado en la personalización de prestaciones y ofertas, dando prioridad a los clientes más rentables para la compañía o a los que potencialmente pueden serlo en un futuro cercano.
- *Orientada a procesos.* En este caso, la compañía se centra principalmente en la mejora de los procesos internos para optimizar la información de sus clientes y reducir así los costes de servicio.
- *Acciones defensivas.* Se trata de los clásicos programas de fidelización basados en puntos, regalos y descuentos. Suelen servir para mantener una estrategia comercial, pero rara vez consiguen una nueva ventaja competitiva.

Teniendo en cuenta la tipología descrita, Gartner (2014) hace alusión en su aproximación teórica a la importancia de los procesos y a su operativa. En las definiciones más antiguas no se pone de relevancia este aspecto de forma tan precisa, ya que alude a una estrategia de negocio que optimiza la rentabilidad, la eficiencia operativa y la satisfacción del cliente mediante la implementación de procesos centrados en el mismo (Valcarcel, 2001).

Cada autor aporta su visión particular que puede constatarse en el cuadro resumen que se ofrece a continuación, donde se describen las principales contribuciones.

3.1. CRM: CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS PRINCIPALES

Según las definiciones descritas, se puede decir que existen rasgos comunes entre todas ellas. Gartner (2001) propone una serie de factores, que pueden tomarse como características comunes que todo CRM debería tener en cuenta para poder alcanzar el éxito. Es el modelo llamado "Eight Building Blocks of CRM". Por tanto, la mayoría de los CRMs deberían incorporar estas pautas como algo inherente a la herramienta:

- 1. Visión.** Desarrollar una estrategia corporativa centrada en el cliente, que permita establecer un sentimiento de la marca para gestionar las expectativas de clientes reales y potenciales. Esto se consigue fidelizar clientes y diferenciarse de la competencia.
- 2. Estrategia.** Una estrategia de CRM real tiene objetivos financieros y establece cómo la empresa va a construir la lealtad del cliente.
- 3. Experiencia de cliente.** Es clave en la imagen de la empresa. Mientras que los clientes satisfechos aportan una publicidad gratuita que permite un crecimiento, en el caso contrario, las situaciones negativas se hacen virales e impactan de forma negativa.
- 4. Colaboración dentro de la organización.** Al implantar un sistema CRM, por sí solo no cumple el objetivo de estar centrado en el cliente. En la mayoría de las ocasiones implica un cambio en las estructuras organizativas, e incluso la cultura de la empresa.
- 5. Procesos.** Las empresas con frecuencia no hablan con sus clientes

Autor	Principales contribuciones
Gronross (1997)	Alusión y propuesta de ciclo de vida del CRM
Paas y Kuijlen (2001)	Evolución y termino al sector financiero
Asociación Española de Marketing Relacional (AEMR, 2001)	Estrategia de tres disciplinas: negocio, marketing y comunicación
Valcarcel (2001)	Procesos centrados en el cliente
Gummesson (2004)	Disciplina que lo sostiene es el marketing relacional y el énfasis en la relación con los clientes
Stanton, Etzel y Walker (2004)	Utilizar de forma inteligente los datos de cliente
Gil-Lafuente, Luis-Bassa, (2010)	Filosofía del negocio centrada en el cliente
Gatner (2014)	Importancia de procesos y operativa

Tabla. 1: Principales contribuciones al concepto CRM
Fuente: Elaboración propia (2015)

y no tienen en cuenta sus expectativas en las reingenierías de procesos. Por ello, deben construir una propuesta de valor para el cliente, y contribuir a una óptima experiencia del cliente.

6. Información. Tener la información correcta en el momento adecuado es fundamental para lograr el éxito. Por desgracia, las capacidades de información en la mayoría de las empresas "son pobres". Debido a la fragmentación de departamentos, el uso de bases de datos no comunes y sistemas propios.

7. Tecnología. Supone una parte más dentro de un sistema que debe estar integrado para alcanzar las metas planteadas. Para ello, no solo debe centrarse en las aplicaciones CRM, sino también en arquitectura e integración para obtener unos procesos centrados en el cliente con el apoyo de la tecnología integrada en toda la empresa.

8. Métricas. Las empresas deben establecer objetivos medibles y monitorizar los indicadores para medir el éxito de una empresa con CRM mediante la creación de una jerarquía de métricas de rendimiento desde distintos enfoques: corporativo, cliente estratégicos, operacional y de procesos. Cada empresa tendrá un conjunto único de indicadores aplicables a su situación.

Dichos beneficios están en línea con los propuestos por la De Pablos et al. (2012), aunque estos aluden a la importancia de la información como activo, al proceso de cambio en las empresas y al aprendizaje organizacional. Como se aprecia en las siguientes ventajas que se describen:

- Posibilidad de identificar oportunidades de negocio
- Incremento de la calidad y la cantidad de información
- Posibilidad de aumentar las ventas y

fidelizar al cliente

- Promueven los procesos de cambio para la mejora
- Posibilitan el aprendizaje empresarial respecto a los clientes mejorando la competitividad e impulsando la reducción de los costes.

4. BIG DATA: DEFINICIÓN Y PRINCIPALES VENTAJAS DE SU IMPLEMENTACIÓN

Como ya se ha expuesto anteriormente, la digitalización en la que estamos inmersos mediante redes sociales, nuevos dispositivos, ciudades inteligentes, etc. supone una multiplicación de la información y del volumen de datos que se gestiona, que crece de forma exponencial.

Por esta razón en este párrafo una aproximación al concepto de grandes volúmenes de datos a través de las diferentes contribuciones apareció en la revisión de la literatura que se ofrece. El objetivo principal consiste en que para entrar en profundidad en el estado de la técnica, y conoce las principales ventajas que la explotación de grandes volúmenes de datos proporciona en los procesos de toma de decisiones estratégicas.

En general, el enfoque inicial de Big Data consistía en trabajar con datos desagregados que no estaban pasando por el circuito de los sistemas corporativos de inteligencia de negocio, por coste y por el esfuerzo que suponía tratarlos con tecnologías tradicionales (Noriega, 2015). Sin embargo esa idea ha ido evolucionando y el concepto hoy en día abarca más funcionalidad que la descrita. El uso y evolución de este sistema va en aumento.

Un ejemplo representativo, son algunos de los datos del centro de innovación de BBVA (2013), donde afirma que en un minuto se transmiten 639.800 Gigabytes de datos, se envían 204 millones de emails y se descargan 47.000 aplicaciones durante 2013. La tendencia a la generación de información continua es cada vez mayor.

De acuerdo con los datos obtenidos de la *Fundación Telefónica* (2016), en un minuto, 4,1 millones de búsquedas se realizan en Google, 347.000 twits se escriben , 3,3 millones de actualizaciones en Facebook son compartidos , 34,7 millones de mensajes de Internet instantáneos se envían y 194.000 aplicaciones están descargado.

Esta aceleración de la velocidad a la que generamos contenido ha propiciado la emergencia de una nueva ciencia: el Big Data. González, et al. (2013), manifiestan que Big Data, es *la gestión de grandes paquetes de información*. Puyol (2013) añade que es un conjunto de datos de gran volumen y complejidad. Estas características dificultan el proceso de gestionar, almacenar y extraer información de valor a partir de ellos.

BBVA define Big Data como "el conjunto de procesos, tecnologías y modelos de negocio que están basados en datos y en capturar el valor que los propios datos encierran". Esto se puede lograr tanto a través de una mejora en la eficiencia gracias al análisis de los datos (una visión más tradicional), como mediante la aparición de nuevos modelos de negocio que supongan un motor de crecimiento.

Dicha información, contempla datos de forma estructurada, semiestructurada o no estructurada. Sin embargo lo importante, no es esa conversión, sino la generación de valor a partir de su procesamiento y análisis.

Ante esto, la gestión de un gran volumen de información que no puede tratarse con los medios tradicionales (Calero, 2013), Serrano-Cobos (2014) apunta que para medir los datos solo hay dos formas: la estadística y la informática y el Big Data es el convivir de ambas. Por lo que el reto, ante tal volumen, es identificar lo relevante y aplicarlo involucrando a todos los agentes implicados (empresas, organizaciones, gobiernos, profesionales y ciudadanos), superando las barreras legales, estructurales y humanas.

Cada autor aporta su visión particular como se puede constatar en el cuadro resumen que se ofrece a continuación donde se describen las principales contribuciones de cada autor.

Ante una tendencia que demuestra que se producirá una intoxicación de información (infoxicación), se desarrollan nuevas herramientas, principalmente de código abierto, que cuenta según BBVA (2013) con las siguientes características:

- Volumen: Las cantidades que se gestionan y de las que se necesita información a tiempo real son ingentes. Un ejemplo es como twitter

Autor	Principales contribuciones
González (2013)	Gestión de la información
Serrano-Cobos (2013)	Big Data = estadística + informática
Centro de innovación BBVA (2013)	Conjunto de procesos, tecnologías y modelos de negocio que están basados en datos y en capturar el valor
Puyol (2013)	Gran volumen y complejidad
Carmago-Vega, et.al. (2015)	Para encontrar la información que es relevante y útil para la sociedad, de manera que permite a la empresa a tomar mejores decisiones y obtener una ventaja competitiva.
Torre-Bastida et al. (2015)	Casos de cómo el Big Data ofrece soluciones CRM

Tabla 2: Contribuciones del concepto Big Data Fuente: Elaboración propia (2015)

genera 8 terabytes al día (80MB por segundo), pero no pasa únicamente en herramientas colaborativas, sino también en las corporativas donde las empresas procesan cada vez más datos en su actividad diaria.

- **Variedad:** Los datos pueden presentarse en formatos muy diversos y se necesita que converjan y puedan interpretarse para convertirse en información.
- **Velocidad:** la velocidad de procesar y capturar datos de fuera y dentro de las empresas ha aumentado de forma significativa.

Por su parte Puyol (2013) además de los factores ya mencionados, añade dos características más:

- **Valor:** valor que se desprende del uso
- **Veracidad:** fiabilidad.

Big Data abre un nuevo mercado repleto de oportunidades. Se puede afirmar que el **Big Data en España**, en 2015, es una realidad y que las tecnologías se han hecho un hueco en el día a día de los departamentos de tecnologías de información de las organizaciones. Aquellos que innovaron en su momento disfrutan ahora de una ventaja competitiva evidente, y los que han apostado más recientemente por soluciones basadas en el Big Data están ya aprovechando sus posibilidades. (Noriega, 2015)

La primera de ellas, es la previsión de una alta demanda de puestos de trabajo cualificados en esta materia. En cuanto a las ventajas principales de su implantación, las áreas que mayor beneficio obtendrán del Big Data (BBVA, 2013), serán las siguientes:

- Marketing personalizado utilizando tendencias sociales
- Visión de negocio precisa
- Segmentación de los clientes
- Captura de oportunidades en venta y marketing
- Toma de decisiones en tiempo real
- Detección de pérdida de clientes

Destacar que el Big Data, para conseguir todos estos factores acude a la personalización absoluta de la experiencia del cliente, a través de algoritmos que permiten desarrollar modelos predictivos. Para su consecución, se formula una pregunta a la que se quiere dar respuesta según la necesidad del negocio, y se depuran los datos existentes. Posteriormente, se seleccionan los algoritmos matemáticos y computacionales más adecuados y se

programan con ayuda de algún software estadístico y con el uso se refinan las variables para obtener el resultado deseado. Un ejemplo característico es como Google ha conseguido segmentar la publicidad y ofrecer aquella que es del interés del usuario.

Pese a lo anteriormente mencionado, nada de esto es posible en el caso de que las empresas no sean capaces de gestionar el cambio para aprovechar las ventajas que supone la utilización de grandes volúmenes de datos. Según, McAfee, et al. (2015) las claves son cinco: liderazgo, gestión del talento, tecnología y toma de decisiones.

Marr (2015) también manifiesta su apoyo a que los elementos estratégicos son la Calidad de los datos, Liderazgo, Personas, Decisiones con datos e Infraestructura. De forma gráfica, la siguiente ilustración apoya la idea mencionada.

Con esto, aparece un nuevo concepto asociado, aplicar procesos de inteligencia en el procesamiento de datos (Kamp, 2016).

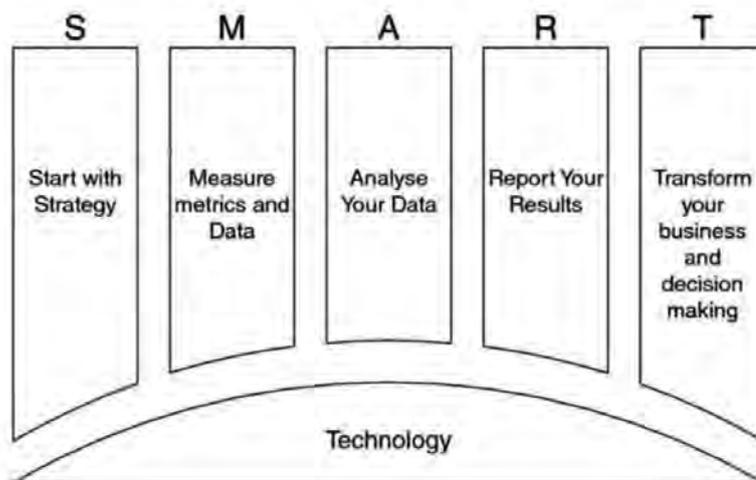


Figura 1: Elementos clave en la implantación de un modelo de datos masivo en las compañías
Fuente: Marr (2015)

Se ha detectado que el concepto de CRM tradicional está muy relacionado tanto con la experiencia del cliente, como con el Big Data. Este, ayuda a la personalización de las experiencias lo que supone un potencial para las compañías (Alfaro et al., 2013).

Tanto los sistemas CRM como Big Data, ayudan a conocer mejor los comportamientos de los clientes, lo cual es importante porque ayudan a crear oportunidades de negocio innovadoras (Almirall & Brunswicker, 2014). Sin embargo, el Big Data también es capaz de generar nuevas oportunidades de negocio basadas en cubrir necesidades particulares, debido a que la tendencia lo complementa con el

Internet de las cosas (IoT), lo que supone que los usuarios pueden personalizar aún más sus productos/servicios debido a la capacidad de añadir "inteligencia" a nuestras "cosas".

Por su parte, y tras el análisis de la literatura, se aprecia que actualmente los sistemas CRMs son sistemas tradicionales dirigidos hacia una moderada cantidad de datos.

En la siguiente imagen de BBVA (2013) se puede ver la relación de los sistemas CRMs dentro del universo de datos.

Mientras que los sistemas CRMs responden a datos internos y estructurados, el Big Data es mucho más amplio. Sin embargo, como manifiestan las áreas de explotación del Big Data, ambos sistemas tienen un propósito en común y sus fortalezas radican en la adquisición, fidelización y detección de pérdida de clientes reales y potenciales.

Aunque mucho se ha hablado de la importancia y la oportunidad que supone gestionar grandes cantidades de datos, y la potencia sea el motivo por el que el Big

Data supone la evolución del CRM, no hay certeza de los cambios provocados por la amplia disponibilidad de grandes volúmenes de datos (es decir, el análisis del sentimiento de marca derivada de fuentes y los medios de comunicación social), de manera que las métricas inevitablemente suben y bajan con el tiempo. Estas "señales de humo digitales" pueden servir como un sistema de alerta temprana de problemas, pero son indicativos, no de confirmación. Los gerentes tendrán que establecer pautas para cuando las alertas tempranas conlleven a tomar decisiones y a la acción (Davenport, 2013).

En general, todas las industrias apuestan para construir una economía basada

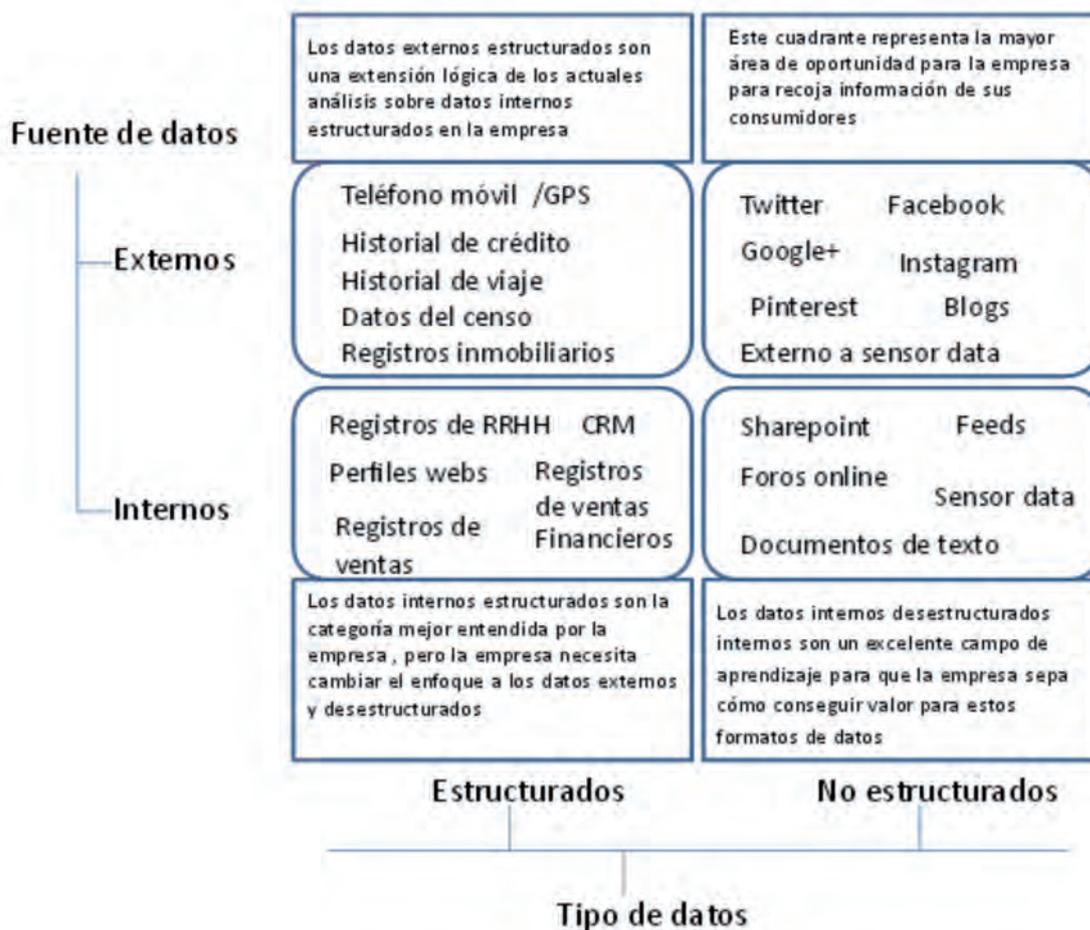


Figura 4: Tipos de datos de acuerdo a la fuente de extracción (BBVA, 2013)

en los datos. Sin embargo, no se alcanzan los resultados deseados. Según Camargo - Vega et al . (2015) algunos motivos pueden explicar una comprensión más baja en la interpretación de los datos procedentes de cualquier sistema en la organización:

- La falta de uso de software de análisis de datos grande o un uso inadecuado de software analítico
- La falta de capacidades internas (*in-house*) para procesar e interpretar los datos
- La falta de cooperación con terceros partes para la extracción e interpretación de datos.

Fundación Telefónica (2016) añade un factor adicional que se convierte en una barrera: el tratamiento de datos personales. CRMs, grandes volúmenes de datos, servicios en la nube o Internet de las cosas recogen una gran cantidad y variedad de datos. Con el objetivo principal de que estos servicios puedan desplegar su potencial, es necesario que la Unión Europea evite una política de mercados fragmentados en todos ellos relacionados con la gestión de datos. Se requiere para eliminar las barreras legales y técnicas que se refiere a la localización de los datos y los

diferentes tratamientos legales ofrecidos a los derechos de autor. La ausencia de normas comunes en las políticas aplicadas por los derechos cuando se utilizan datos, la falta de sistemas interoperables y abiertos y la portabilidad de los datos se convierten en obstáculos para beneficiarse de estos sistemas.

5. CONCLUSIÓN

Las empresas tecnológicas de gran tamaño, apuestan por la comercialización de productos que permiten la gestión y explotación de los datos. Los sistemas CRMs cuentan con un alto nivel de desarrollo en el mercado, no sólo bajo la base de un sistema tradicional, sino por medio de las redes sociales aplicadas a los productos nuevos y tradicionales más sofisticadas. El valor añadido de la información se deriva del análisis de los datos procedentes de los comportamientos del cliente, y el principal beneficio que pueden ofrecer a las empresas es el impacto en la satisfacción del cliente y el potencial que tienen por lo que las empresas pueden tener una visión completa de productos y servicios, desde la adquisición hasta la pérdida de fidelidad /cliente, permitiendo el análisis de la rentabilidad de cada uno de ellos.

El potencial está orientado a ambas áreas, tecnológicas y de gestión.

Big Data es el resultado de grandes cantidades de información que se produce por la aplicación de nuevas herramientas como sensores, micrófonos, cámaras, escáneres médicos, imágenes, etc.

El Big Data supone un gran avance en el procesamiento de datos debido a la velocidad del análisis. Actualmente es necesario un ecosistema conectado para poder analizar las grandes cantidades de datos. Existen plataformas que proporcionan lo necesario: alta disponibilidad, seguridad, optimización, depuración y monitoreo construidas para ser ejecutadas en sistemas distribuidos a gran escala diseñados para tratar con grandes volúmenes de información, analizando tanto datos estructurados como no estructurados. Así, las organizaciones puedan dedicar su tiempo a analizar y no a implementar. Por lo que pueden centrar sus esfuerzos en la orientación de resultados como desarrollo de estrategias de innovación, ventas, etc.

De acuerdo con la literatura, el siguiente paso debe estar orientada a migrar de la transformación de gran cantidad de datos (Big Data) para el tratamiento de los datos que proporcionan un valor (Smart Data). Esta gran cantidad de datos

unidireccional puede administrarse mejor. "El enfoque inteligente de datos no sólo permitirá la predicción, pero proporciona recomendaciones más fiables. Por esta razón, en las áreas de marketing se utilizan cada vez más para mejorar la eficiencia. Hoy en día, estos métodos no son lo suficientemente eficaces, como muestran las cifras: el 61,4% de los usuarios no tienen en cuenta la información personalizada que reciben o que porcentaje se convierte en un 17,23% cada vez que la información está directamente buscado por ellos" (Fundación Telefónica, 2016).

Con estas ventajas es un hecho que el Big Data supone una revolución de datos comercializables, y este es su verdadero modelo de negocio. No está destinado como el CRM a la orientación hacia productos o servicios, sino que la información es un bien en sí mismo.

Ambos sistemas dependen de las necesidades de la organización. Su implementación requiere de altas inversiones en términos de gastos de organización. Por lo que si ambas herramientas son explotadas correctamente, pueden ofrecer un ahorro en el tiempo dedicado a las acciones de gestión, y por lo tanto, en los costos finales de ofrecer un producto o un servicio. Ambas herramientas se pueden aplicar a diferentes necesidades de la organización. CRM y grandes volúmenes de datos deben hacer posible y permitir el uso de diferentes variables económicas, al mismo tiempo, de naturaleza financiera. En las áreas de comercialización deben permitir la segmentación correctamente y medir la eficacia de las inversiones realizadas en campañas de marketing. En las áreas de ventas, las funciones más importantes consisten en el diagnóstico de los clientes potenciales. En las áreas de Recursos Humanos deben permitir que los candidatos de valor e implementar sistemas para la retención de los empleados. Todas estas acciones pueden ser más ajustadas a los objetivos específicos de la empresa a medida que se recogen más datos. Por estas razones, las empresas tienen que desarrollar sistemas para llegar a una mejor gestión de los datos.

En definitiva, es necesario añadir valor a los servicios existentes para poder competir, y por ello, los datos correctamente explotados pueden marcar la diferencia entre que un producto sea o no exitoso.

Por último, este trabajo ha podido constatar que parte de la bibliografía consultada (Puyol, 2013; BBVA, 2013), predijo al año 2015, como el año de la revolución y expansión del Big Data.

Como futura línea de investigación, que será interesante probar si el impacto de las tecnologías en los resultados de la firma ya ha tenido lugar o, por el contrario, debe ser conveniente esperar a una aceptación más profunda y la aplicación de ambas a las empresas. También será interesante analizar en profundidad la relación entre el CRM y la experiencia del cliente.

PARA SABER MÁS

- [1] AEMR I Estudio del CRM en España, 2002
- [2] Alfaro, E., Velilla, J., Brunetta, H., Navarro, B., Molina, C., Martínez, L., & Muñoz, B. (2013). "Customer experience. Una visión multidimensional del marketing de experiencias".
- [3] Almirall, E., & Brunswicker, S. (2014). "Internet of things", Big Data y Small Data: infinitas posibilidades de análisis". Harvard Deusto Marketing y Ventas, Vol.120, p.32-37.
- [4] Aportela, I. M., Gallego, C. "La información como recurso estratégico en las empresas de base tecnológica". Revista General de Información y Documentación, 2015:25 Vol.2,p.265-285.
- [5] BBVA Innovation Center. "Big Data : es hora de generar valor de negocio con los datos". Innovation Edge 2013 Vol.6.
- [6] Bernal, C. "Metodología de la investigación",2006. México: Pearson
- [7] Calero, A. "Nueva Ciencia y tecnología de Redes. Una nueva forma de tratar la complejidad". Telos: Cuadernos de comunicación e innovación, 2013 Vol.95, p.87-90.
- [8] Camargo-Vega, Juan José, Camargo-Ortega, Jonathan Felipe, & Joyanes-Aguilar, Luis. (2015). Conociendo Big Data . Revista Facultad de Ingeniería , 24(38), 63-77. Retrieved May 30, 2016, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-11292015000100006&lng=en&lng=es.
- [9] Cambra-Fierro, J., Centeno, E., Olavarría, A. y Vázquez-Carrasco, R. "Factores de éxito de CRM: un estudio exploratorio en el sector bancario español". Unversia Business Review, 2014 Vol.43
- [10] Cava, L. G. "CRM: Tres estrategias de éxito". España: e-business Center PricewaterhouseCoopers & IESE,2004.
- [11] Davenport, T. H. " Analytics 3.0". Harvard Business Review, 2013: 91 Vol.12, p.64
- [12] Gil Lafuente A.M, Luis-Bassa, C. "La Innovación centrada en el cliente utilizando el modelo de Inferencias en una estrategia CRM". Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa.2011: 17 Vol.2 p.015-032.
- [13] González Alcaide, G., Gómez Ferri, J., & Agulló Calatayud, V. "La colaboración científica: una aproximación multidisciplinar", 2013: 1. Nau Llibres.
- [14] Grönross, C. "Value-Driven Relational Marketing: From Products to Resources and Competencies". Journal of Marketing Management, 1997 Vol.13,
- [15] Gummeson, E. "Return on Relationships (ROR): The value of Relationship Marketing and CRM in Business-to-Business Contexts", The Journal of Business & Industrial Marketing, 2004: Vol.19 (2),p.136-148
- [16] Kamp, B. "Servitización: génesis, temas actuales y mirada al futuro". *Economiaz: Revista vasca de economía*, 2016 Vol.89,p. 252-279.
- [17] Marr, Bernard. "Big Data : using SMART Big Data , analytics and metrics to make better decisions and improve performance". John Wiley & Sons, 2015.
- [18] McAfee, A., Brynjolfsson, E., Davenport, T. H., Patil, D. J., & Barton, D. "Big Data . The management revolution". Harvard Business Review, 2012, 90 Vol.10, p.61-67.
- [19] Paas, L; Kuijlen, T. "Towards a General Definition of Customer Relationship Management", Journal of Database Marketing, 2001: 9 (1) p.51-60
- [20] Pablos, C. et al. "Organización y transformación de los sistemas de información en la empresa". ESIC Editorial. 2012.
- [21] Puyol Moreno, J. "Una aproximación a Big Data = An approach to Big Data ", *Revista de Derecho UNED*, 2014, no 14, p. 471.
- [22] Radcliffe, J. "Eight building blocks of CRM: A framework for success.Gartner research", 2001 Vol.13, p.1-4.
- [23] Serrano-Cobos, J. "Big Data y analítica web. Estudiar las corrientes y pescar en un océano de datos". El profesional de la información, 2014: 23Vol.6, p.561-565.
- [24] Stanton, W.; Etzel, M. y Walker B. "Fundamentos de marketing". 2004. México. Editorial McGraw-Hill.
- [25] Torre-Bastida, A. I., Villar-Rodríguez, E., Del Ser, J., & Gil-Lopez, S."Semantic Information Fusion of Linked Open Data and Social Big Data for the Creation of an Extended Corporate CRM Database. In Intelligent Distributed Computing VIII. Springer International Publishing.2015 pp. 211-221
- [26] Valcárcel, I. G. "CRM: gestión de la relación con los clientes". 2001. FC Editorial.
- [27] Fundación Telefónica. La sociedad de la información. Madrid:2016

Evolución del sector eléctrico tras la Segunda Guerra Mundial

Evolution of the electricity sector after the 2nd world war

Juan-Aurelio Montero-Sousa, José-Luis Casteleiro-Roca y José-Luis Calvo-Rolle
Universidade da Coruña (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8121>

Tras la Segunda Guerra Mundial y los destrozos producidos por la misma, sobre todo en Europa, surge lo que se ha denominado "*Estado de Bienestar*", tratando de facilitar a los ciudadanos una serie de servicios. Solventar las necesidades energéticas se convierte en una cuestión fundamental, no sólo para los ciudadanos, sino también para las empresas, ya que la demanda crece año a año.

En el trabajo previo [1] se hizo referencia a la fase de nacimiento y consolidación, teniendo en cuenta las diversas vertientes presentes (tecnológica, económica, etc.); además, se realiza en dicho artículo una comparación entre el desarrollo del sector en España y en el resto de países de su entorno. La fase inicial se caracteriza por la existencia de pequeñas empresas de ámbito local, con diferencias en la tecnología empleada. En una segunda etapa, se impone como patrón la utilización de la corriente alterna con generación hidroeléctrica. Debido a las grandes cantidades de capital que se tenía que invertir, se produjo una concentración de empresas y la aparición de oligopolios.

En esta investigación, se realizará un análisis de la situación del sector en las etapas posteriores a la Segunda Guerra Mundial. Primero, se hará referencia a la etapa de intervención del Estado, que en algún caso lleva a la nacionalización del sector. Luego, se realizará mención a la aparición de nuevas fuentes de energía primaria (nuclear, eólica, solar, etc.). Posteriormente, se efectuará un análisis de los procesos de liberalización del mercado eléctrico y, en el caso europeo, a la incidencia de la legislación comunitaria. A continuación, se realizará una proyección de las perspectivas de futuro del sector para, finalmente, exponer las conclusiones.

Básicamente, tras la Segunda Guerra Mundial, se pueden diferenciar dos fases:

- En primer lugar, una etapa de intervención del Estado en el sector.
- Posteriormente, un movimiento de sentido contrario, que conlleva la liberalización del sector, con una tendencia significativa a la privatización.

Después de la presente introducción, se hará referencia a los antecedentes de la intervención del Estado en el sector y a la fase de intervención misma. Posteriormente, se hará mención a la aparición de nuevas fuentes primarias para la generación de electricidad. Seguidamente, se comentará la crisis energética del año 1973 y sus efectos sobre el sector. Después, se explicará el proceso de desregulación del sector y la influencia de la legislación comunitaria en el caso europeo. Finalmente se analizarán las perspectivas de futura evolución y se presentarán las conclusiones.

1. INTERVENCIONISMO Y NACIONALIZACIÓN DEL ESTADO EN EL SECTOR ELÉCTRICO (1945-1980)

En la década de los treinta del siglo XX, tras la crisis económica de 1929, se difunden las teorías económicas keynesianas, basadas en el incentivo de la economía a través de la inversión pública y la intervención del Estado. Las consecuencias de dicha crisis, con multiplicación del número de desempleados, hicieron que se planteara la necesidad de aumentar el Gasto Público para que, de esta forma, aumentara el empleo; estos empleados adquirirían bienes y servicios y las empresas a su vez contratarían a más trabajadores (efecto multiplicador).

Se ponen en marcha programas de obras públicas. El sector eléctrico no fue ajeno a estos programas [2]. En los Estados Unidos, el programa del *New Deal* del presidente norteamericano Roosevelt, incluía la realización de obras públicas hidráulicas, tales como las del programa de la Autoridad del Valle del Tennessee [3].

Durante la "*Gran Depresión*", como es conocida la crisis económica mundial de 1929, las sociedades europeas, que se habían empeñado en grandes inversiones en obras hidráulicas en el decenio anterior, comenzaron a encontrar dificultades para colocar la energía sobrante de las nuevas instalaciones. Tanto en Francia, como en Inglaterra y Alemania, se propusieron políticas incentivadoras de los usos domésticos. Se producen, en este momento un mayor intervencionismo del Estado en los servicios públicos y las primeras discusiones sobre la nacionalización del gas, la electricidad y los transportes [4]. Por otra parte, aparece en escena una nueva potencia a nivel mundial, la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (U.R.S.S.), el primer estado en implantar un modelo comunista, con un programa de industrialización acelerada, en el cual la electrificación ocupaba un papel preponderante [5].

Tras la Segunda Guerra Mundial, y la derrota del fascismo, se abrió una nueva etapa en las democracias occidentales. Surgieron, sobre todo en Europa, nuevas políticas que dieron lugar a lo que se ha dado en llamar "*Estado de Bienestar*". El Estado pasa a garantizar a los ciudadanos una serie de servicios (educación, sanidad...).

1.1. INTERVENCIÓN DEL ESTADO EN EL SECTOR ELÉCTRICO

Tras la Segunda Guerra Mundial y los destrozos causados por el conflicto bélico surge un nuevo panorama que afecta, como no podía ser de otra forma, al sector eléctrico. Debido a la escasez de fuentes de energía de origen primaria, sobre todo carbón, la cuestión energética se convierte en crucial. Una primera forma de intervención se centra en la construcción de interconexiones de las redes a nivel nacional, integrándose mercados más extensos que los de origen local o regional. Era necesario fomentar la coordinación de redes a nivel nacional. También se intensifica la electrificación rural y los usos domésticos de la electricidad, con la generalización del uso de los electrodomésticos. Además, se electrifica el transporte por ferrocarril.

De una parte, se extiende la consideración de la electricidad como un servicio público y se implanta a nivel económico una política de control sobre las tarifas. Se

presenta, en esta etapa, una lucha entre la tendencia neoliberal, enmarcada en la concentración de las empresas en grandes grupos eléctricos, y la opción que defiende la intervención del Estado en la economía, en general, y en el sector eléctrico, en particular [4].

España se ve afectada por las secuelas de su Guerra Civil y, al igual que en Europa, los efectos de la guerra provocaron que se tuvieran que reponer equipos y reparar instalaciones. En el caso español, el déficit de generación provocó que hasta aproximadamente 1957 se impusieran restricciones al consumo, con cortes en el suministro eléctrico. La primera etapa del franquismo, de carácter autárquico, impidió que se pudieran comprar equipos y repuestos en el exterior [6]. Durante los primeros años de la postguerra, la escasez de hidrocarburos y estricta regulación del sector del carbón convirtieron a la electricidad en la energía que más creció en consumo (entre 1940 y 1943 se duplicó el consumo de electricidad en relación con el quinquenio anterior al comienzo de la Guerra Civil) [7, 8]. Esta circunstancia incentivó que las grandes empresas eléctricas trataran de poner en servicio los recursos hidráulicos que todavía no se habían explotado, pese a las mencionadas dificultades [9].

Se producen en Europa y en América una marcada intervención del Estado en el sector eléctrico en diferentes grados y formas. El sector tenía la consideración de monopolio natural con regulación pública. Las actividades que realizaba se desarrollaban en torno a una red y se considera que se organizan mejor constituyendo un monopolio, que evitarían duplicidades, ya que instalar varias redes multiplicaba el coste [10, 11].

Países como Francia con EdF, creada en 1946, Gran Bretaña con CEGB, creada en 1947, Italia con ENEL constituida en 1962, o Portugal con EdP, formada en 1976; nacionalizaron su sector eléctrico [11]. Aparecen, en éstos y otros muchos países, monopolios nacionales con empresa única, que puede tener titularidad pública o privada y que realizan una planificación centralizada, efectuando la explotación única del sistema y realizando la fijación de las tarifas.

En los países en los que no se llevó a cabo la nacionalización del sector, caso de Alemania, los Estados Unidos o España, la industria eléctrica se convirtió en una de las industrias más reguladas por el Estado. El caso español tiene similitud con el caso estadounidense; el sistema se caracteriza por la existencia de múltiples empresas privadas, integradas verticalmente, que

tienen obligación de suministrar electricidad a una determinada zona [12].

Por otra parte, en España durante la época franquista, se fomentó la construcción de embalses y se regularon las tarifas eléctricas. Incluso el Estado llegó a entrar en el campo de la generación eléctrica, en este caso de origen térmico, a través de la creación de Endesa, empresa adscrita al Instituto Nacional de Industria (INI), pero no se llegó a constituir ningún monopolio estatal [13]. Se podría decir que las empresas eléctricas se autorregulaban tras la fundación de UNESA (Unidad Eléctrica, S.A.) en 1944; esta asociación fue creada por 18 empresas eléctricas españolas para la gestión unificada y autónoma de la red [14]. Asimismo, el Estado español intervino para que las empresas que continuaban en manos extranjeras (caso de la Sevillana y la Canadiense) pasaran a ser controladas por capital nacional.

1.2. APARICIÓN DE NUEVAS FUENTES PRIMARIAS DE ENERGÍA

Esta etapa se caracteriza por la aparición de nuevas fuentes primarias para la producción de energía eléctrica, entre las que cabe destacar la nuclear. Inicialmente se empleó para fines militares; posteriormente se comenzó a utilizar para la producción de electricidad, no sin la polémica derivada de los riesgos de su aplicación (posible escapes radiactivos, tratamiento de los residuos...). Inglaterra y los Estados Unidos hicieron las primeras aproximaciones para la aplicación de la energía nuclear para usos civiles. En el país norteamericano, la amplia disponibilidad de otro tipo de combustible hizo que, en un principio, no hubiera excesivo interés en el uso civil de la desintegración del átomo, pero se trató de desarrollar la tecnología para su aplicación en la propulsión de barcos y submarinos. Así se desarrolló la tecnología del reactor que utilizaba agua presurizada. En Inglaterra desarrollaron el sistema Magnox, que empleaba uranio junto con un moderador de grafito refrigerado por CO_2 ; de este tipo fue el primer reactor nuclear de uso comercial, puesto a funcionar en 1956 en *Calder Hall*. Año y medio más tarde comenzó a funcionar la pri-

mera central nuclear americana en *Shippingport* (Figura 1) [15].

En España, la primera central nuclear fue inaugurada el 12 de diciembre de 1968, la central *José Cabrera* (conocida como Zorita). El Plan Energético Nacional de 1975 pretendía potenciar la energía nuclear, pero España que carecía de tecnología nuclear propia, tuvo que importarla [8].

También se produjeron progresos significativos en el ámbito de la generación térmica. Los combustibles utilizados en estas centrales pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos. Las instalaciones de este tipo más usuales en el año 1960 eran las de turbina de vapor a condensación total, alimentadas con combustible de tipo tradicional (carbón fósil), que representaban el 90% de las instalaciones termoeléctricas del mundo. Pero se producen en el campo de la generación térmica una serie de mejoras centradas en [16]:

- El empleo del ciclo de recalentamiento (un recorrido con doble calentamiento del vapor para una mayor efectividad), mejorando el ciclo de *Rankine*.
- El uso de materiales con aleaciones más resistentes al calor y la presión.
- El desarrollo de maquinaria de potencia unitaria más elevada.
- La aplicación de la electrónica para la regulación y el control de las plantas.

Aparecen centrales térmicas de ciclo combinado que generan electricidad mediante la combinación de dos ciclos termodinámicos: el correspondiente a una turbina de gas (ciclo *Brayton*) y el convencional de turbina de vapor (ciclo *Rankine*). En el ámbito de la producción hidráulica, se reduce el coste de funcionamiento de la planta [15].

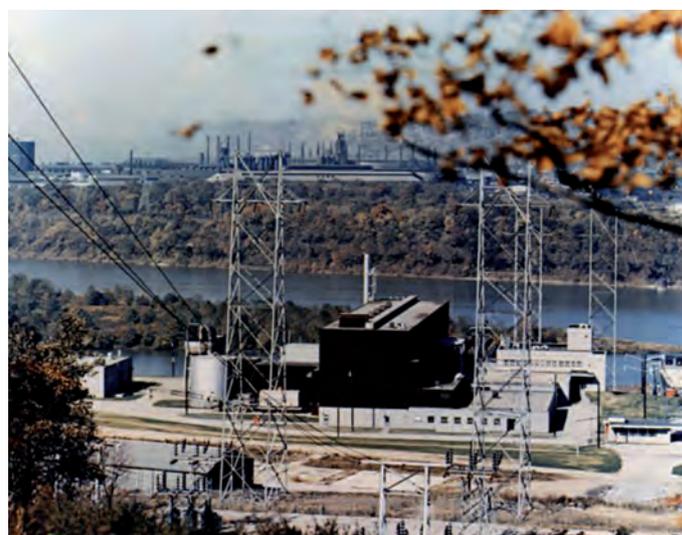


Figura 1: Central nuclear de Shippingport, Pensilvania

Antes de la crisis del petróleo de 1973, se producen incrementos anuales constantes y significativos en el consumo de electricidad. Se puede considerar la época de mayor madurez y prosperidad de la industria eléctrica [17].

1.3. LA CRISIS ENERGÉTICA DE 1973

Desde el fin de la Segunda Guerra Mundial y hasta 1973, se produce un aumento espectacular del papel del petróleo como fuente de energía primaria; esto tuvo su reflejo en la generación eléctrica. Se introduce de forma masiva el petróleo como fuente primaria en la producción térmica de electricidad debido al bajo precio de este combustible.

En 1973 el precio del petróleo se incrementó de forma notable, pasó de 3 a 34 dólares el barril. Esto afectó de manera considerable a los países del mundo occidental, especialmente aquellos países que no eran productores y dependían de las importaciones de dicho combustible y de sus derivados. Se produjo un encarecimiento de todas las actividades que de una u otra forma estaban relacionadas con el petróleo.

La crisis causó una desaceleración de la demanda de electricidad, y el inicio de la búsqueda de nuevas opciones tecnológicas para la generación de electricidad, procurando disminuir la utilización de derivados del petróleo para producir electricidad y sustituyéndolos, inicialmente, por carbón y energía de origen nuclear y, posteriormente, por energía de origen renovable. En Francia, por ejemplo, se impulsó el plan *Meesmer*, que convirtió la energía nuclear en la principal fuente generadora de electricidad.

En España se aprobó un primer *Plan Energético Nacional* en 1973 para paliar los efectos de la crisis, estimulando la utilización de otras energías (térmicas y, sobre todo, nucleares). Con el Plan Energético Nacional de 1979 se repercutió directamente el precio del petróleo a los ciudadanos y se consolidó la política favorable al consumo del carbón nacional. El Plan Energético Nacional de 1983 suspendió la construcción de nuevas centrales nucleares y paralizó algunas de las que estaban en construcción; también, implementó una política de racionalización de la generación y del consumo [8].

2. DESREGULACIÓN DEL SECTOR ELÉCTRICO

Tras el anterior período de intervención del Estado, en la década de los noventa

del siglo XX, surge una nueva etapa de liberalización de la economía, en general, y de los sectores ligados al transporte, las telecomunicaciones y a la energía, en particular, donde se encuentra encuadrado el sector eléctrico. Esta tendencia se extendió tanto en América Latina (siendo Chile, en la década de los ochenta, el pionero en esta desregulación del sector), como en América del Norte, Europa, u Oceanía [18].

Se han indicado como principales motivos que han llevado a la liberalización del mercado eléctrico [15]:

- La aparición de nuevas tecnologías de generación, especialmente los ciclos combinados de turbinas de gas, los cuales han reducido el tamaño óptimo de un generador de electricidad.
- La globalización de la economía, que requiere reducciones en los costes de la energía, y la energía que alimenta la mayoría de las industrias es la electricidad.
- La idea de que el Estado no responde tan rápidamente como la iniciativa privada a los cambios en la economía y en la tecnología, lo cual ha incitado las privatizaciones.
- La aparición de nuevas tecnologías de la información y de sistemas de comunicación, que hacen posible el intercambio de los grandes volúmenes de información necesarios para gestionar los mercados eléctricos.
- La creación de un mercado único en Europa, permitiendo que las empresas de los países miembros de la Unión Europea compitan entre sí.
- Un giro político conservador en las décadas finales del siglo XX con gobiernos como los de Reagan y Thatcher.
- En América Latina, el deseo de atraer capital privado; argumentando que la financiación estatal debía utilizarse para sufragar gastos de educación, infraestructuras...

Con la aparición de nuevas tecnologías (ciclos combinados, energías renovables...), y de nuevas estrategias de gestión, se hace innecesario contar con economías de escala y, por tanto, deja de ser un argumento para mantener los monopolios (Figura 2). Ya a partir de la década de los sesenta del siglo XX, se empezó a cuestionar, primero en los Estados Unidos y posteriormente en el resto de los países, la eficacia de la estructura monopolística de las empresas eléctricas. Se pasó a considerar que los monopolios de las empresas eléctricas tenían una tendencia a sobreinvertir y, por tanto, incrementar el coste

de la electricidad, ya que la empresa recuperaba en todo caso su inversión al tratarse de un mercado con empresa única y sin competencia [19]. Según esta corriente, las inversiones en el sector público no se orientan a la máxima eficacia. Las tarifas, que, a menudo, eran fijadas por el Estado, no reflejaban los verdaderos costes porque, con frecuencia, se utilizan como armas electorales para atraer votantes [20].

Generalmente, la liberalización va pareja a la privatización de sectores industriales que anteriormente se mantenían en propiedad del Estado o estaban controlados por los Gobiernos. Sin embargo, estos procesos liberalizadores chocan con las características específicas de los mercados eléctricos. Las más destacadas [21]:

- La no almacenabilidad de la energía eléctrica
- La necesidad de cuadrar en todo momento la oferta y la demanda de energía
- Estacionalidad en la demanda y volatilidad en la producción de las energías renovables
- Coexistencia de diversas tecnologías de generación
- La consideración de la electricidad como un bien homogéneo, en el que no se puede distinguir el origen y la procedencia de cada kilovatio hora
- Utilización de una red de distribución que impone restricciones cuando se ve saturada.

Estas características dificultan que la electricidad se pueda regir como el resto de los productos de una economía de mercado. En especial, conlleva que sea difícil establecer mecanismos para determinar los precios y establecer una regulación estable.

En España, se puede considerar que la Ley 40/94, de Ordenación del Sistema Eléctrico Nacional, es la primera que introduce criterios de competencia en la integración de nuevas instalaciones eléctricas y crea el embrión de un sistema independiente. La Ley regulaba dos sistemas para prestar suministro eléctrico que podían desarrollarse de forma simultánea: el sistema integrado (servicio público regulado por la Administración, aunque prestado por empresas privadas) y el sistema independiente (una parte de la producción podría ser vendida según las reglas de mercado). En esta Ley también se introduce una nueva actividad, la comercializadora, y la libertad de acceso a las redes de transporte y distribución de electricidad. El verdadero desarrollo del proceso de apertura a la competencia se produce

en años posteriores, con el impulso dado a través de las Directivas comunitarias [22].

2.1. IMPORTANCIA DE LA LEGISLACIÓN DE ÁMBITO COMUNITARIO EN EUROPA

Tras finalizar la Segunda Guerra Mundial se constituye en Europa una organización de carácter supranacional denominada inicialmente Comunidad Económica. Esta organización, que actualmente ha pasado a denominarse Unión Europea, ha cobrado especial fuerza por el número de miembros y por haber implantado una serie de normas para armonizar sus legislaciones. Fruto de estas políticas ha surgido una legislación europea sobre el sector energético. Se trata de diferentes Reglamentos y Directivas, que son de aplicación directa en los Estados miembros, o que estos tienen que transponer a sus respectivas legislaciones. Se suele hablar de tres sucesivos paquetes legislativos en el sector energético europeo. De entre la legislación de estos paquetes debemos destacar, por su relación con el sector eléctrico, las siguientes normas:

- La Directiva 96/92/CE que recoge el principio de libertad de establecimiento de generación, el despacho de grupos de generación por criterios de precedencia económica, el libre acceso de terceros a las redes de transporte y distribución, la separación contable de las actividades eléctricas y la libertad de elección de suministrador para los consumidores [23].
- La Directiva 2003/54/CE, que adelanta las fechas para la libertad de elección de suministrador, profundiza en la separación jurídica entre actividades eléctricas, marca claramente las obligaciones de servicio público y se hace mención a la protección del medio ambiente, a la eficiencia energética y la seguridad en el suministro [24].

- La Directiva 2009/72/CE, sobre normas comunes para el mercado interior de la electricidad, forma parte del denominado tercer paquete legislativo en el sector energético relativo a los sectores gasistas y eléctrico [25]. Esta directiva profundiza en la liberalización del mercado; en particular en los siguientes aspectos:

1. Combatir el cambio climático, con el objetivo de que en 2020 el 20% de la energía comunitaria proceda de fuentes renovables. Esto hace necesario mejorar la competitividad y liberalización del mercado.
2. Desarrollar mercados auténticamente competitivos en lo referente a la organización de la actividad de transporte y operación del sistema. Se considera que son insuficientes las normas que se han implantado en los estados, estableciendo la separación de la explotación de la red de las actividades de suministro y producción, o generación. Se cree imprescindible llevar a cabo una separación de actividades. Para ello, los estados deben garantizar que la misma entidad no pueda ejercer un control sobre una empresa de suministro y, al mismo tiempo, tener intereses o ejercer derechos de cualquier tipo sobre el gestor de una red.
3. Se incide en avanzar en el modelo de separación de las funciones de operación de sistema y de transporte hacia el denominado "gestor de red independiente", aunque se permitan dos modelos alternativos: la separación total de la propiedad y el "gestor de transporte independiente".
4. Se promueve la integración de los distintos mercados internos de los estados miembros, la coordinación de las operaciones de transporte a

nivel transfronterizo y refuerza el papel de los órganos reguladores y su independencia. Así, por ejemplo, se ha creado el MIBEL (Mercado Ibérico de la Electricidad, constituido por España y Portugal).

Se trata con esta regulación de impulsar, no sin reticencias, un auténtico mercado eléctrico, potenciando las conexiones intracomunitarias, separando la propiedad de las redes de transporte de las actividades de producción y suministro, y cediendo el control a reguladores teóricamente independientes del poder político. Alemania y Francia manifestaron su oposición a la separación vertical de actividades. Estos dos países tenían grandes empresas integradas verticalmente (E.ON y Électricité de France) que eran propietarias de la red. De hecho, la Comisión permitió un segundo modelo alternativo, que permitía a las empresas integradas verticalmente mantener la propiedad de su red si ésta se gestiona por un operador independiente.

3. PERSPECTIVAS DE FUTURO

En los últimos tiempos, han surgido nuevos retos, como combatir el cambio climático, esquivar la volatilidad del precio de los combustibles fósiles o integrar en el sistema la producción procedente de las energías renovables [18]. También, se han detectado problemas para establecer el modelo regulatorio estable. En este sentido, la configuración del sector se puede entender como una cuestión permanentemente inacabada, con dificultades para encontrar una regulación adecuada. Situaciones como la crisis de California, en los años 2000 y 2001, han hecho, en muchos casos, replantear los presupuestos iniciales del proceso liberalizador [26]. En cualquier caso, se ha considerado que el modelo a seguir es el inglés y el de los países nórdicos, aunque siempre habría que considerar las peculiaridades de cada país [18].

La aparición de las denominadas energías renovables (eólica, solar, undimotriz, etc.) ha introducido nuevos factores en la gestión del sector eléctrico. Por una parte, se hace difícil que coincidan en todo momento la generación, que es altamente volátil en función de la disponibilidad de la energía renovable (viento, sol...), y el consumo, que es estacional, dependiendo de la hora del día y de la estación del año. En algunas ocasiones, se genera gran cantidad de energía renovable en momentos en que la demanda es escasa; en otras, existe una escasa energía renovable



Figura 2: Ejemplo de instalación de energías renovables

cuando la demanda es alta, por lo cual, es necesario disponer de generación de carácter convencional (nuclear, térmica...) para cubrir ese déficit [18].

En España, en los últimos años, se ha asistido a constantes cambios legislativos en el sector, lo cual ha provocado incertidumbre entre los inversores y entre los consumidores, que se han visto presionados por los constantes incrementos de las tarifas [22].

La rápida evolución tecnológica puede en el futuro dar solución a varias de las cuestiones planteadas. Los nuevos sistemas de almacenaje de electricidad (baterías, súpercondensadores, hidrógeno...) pueden hacer más eficientes y baratas las operaciones de producción y distribución de energía. Las *Smart Grids* o redes eléctricas inteligentes, que integran los desarrollos en ingeniería eléctrica y los avances de las tecnologías de la información y comunicación, pueden ayudar a una mejor gestión dentro del negocio de la generación, transmisión, distribución y comercialización eléctrica, facilitando la integración de las energías renovables [18, 27].

4. CONCLUSIONES

Dentro de la brevedad que se exige a un artículo, se ha pretendido en este texto reflejar las principales líneas que ha seguido el sector eléctrico en el mundo occidental tras la Segunda Guerra Mundial hasta la actualidad. La importante evolución tecnológica que ha sufrido el sector, especialmente en los últimos años ha producido cambios de importancia en el mismo. Falta, quizás, un estudio monográfico más profundo sobre el impacto de la regulación legal del sistema eléctrico.

Presenciamos, también, una constante búsqueda de nuevas fuentes primarias para generar electricidad, surgiendo la energía nuclear y más recientemente las energías renovables, que se obtiene de fuentes naturales inagotables; se tiene que hacer referencia también a la evolución y mejora en las fuentes tradicionales, la hidráulica y la térmica. El auge de las nuevas fuentes de energía está relacionado con la necesidad de reducir el impacto en el medioambiente y por la necesidad de encontrar alternativa a las fuentes de energía agotables: los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) y la energía nuclear.

La llamada "economía del hidrógeno" está alcanzando cierta madurez; quizás el sector en que mayor impacto puede tener la utilización del hidrógeno como fuente

de energía, es en el sector del transporte, sin olvidar su aplicación en la generación de electricidad. En el sector del transporte en Islandia se ha planificado, para la década 2030-2040, usar pilas de hidrógeno para mover todos los medios de transporte del país.

Una de las eternas dudas en la política energética de los diferentes países es encontrar la combinación perfecta entre las diferentes modalidades de energía primaria utilizadas para producir electricidad (el llamado mix energético). Por otra parte, desde el punto de vista de la normativa que regula el sector, se puede observar una evolución desde la total libertad de instalación de empresa, pasando por la declaración de servicio público, con la posterior intervención del Estado en el sector eléctrico, llegando en algunos países a su nacionalización. Actualmente asistimos a la liberalización del sector; sin embargo, hechos recientes han puesto en cuestión la forma en que se ha tratado de implementar la regulación de estos modelos. Esta política liberalizadora ha producido resultados contradictorios; mientras que Chile se puede presentar como paradigma del éxito, con aumento constante de la demanda y rebaja de los precios, la crisis energética de California, en el año 2000, representa un monumental fracaso que ha influido en las propuestas de liberalización del sector eléctrico, frenándolas o cuestionando la forma de llevarlas a cabo.

En el caso de los países miembros de la Unión Europea ha cobrado especial relevancia las pautas marcadas por la regulación comunitaria, a la cual se supedita la regulación de los países que son miembros de esta organización supranacional, caso de España.

PARA SABER MÁS

[1] Montero Sousa J A, Castelleiro-Roca J L, Calvo-Rolle J L. "El sector eléctrico desde su inicio hasta la Segunda Guerra Mundial". DYNA, Enero 2017, vol. 92, no. 1, p.43-47. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7947>

[2] Sotelo J, de Unamuno J, Cáceres J I et al Teorías y modelos macroeconómicos, Madrid, ESIC, 2003 ISBN 8473563387

[3] Nye DA. *Electrifying America. Social Meanings of New Technology.* MIT. 1990. 495 p. ISBN 978-0262640305

[4] Giannetti R, Segreto L, Vasta M et al *Storia dell'industria elettrica in Italia Roma. Laterza Vol.1 1992 Le origini (1882-1914) ISBN: 8842039160, Vol 2, 1993, Il potenziamento tecnico e finanziario (1914-1925) ISBN: 8842041319, Vol. 3, 1993, Espansione e oligopolio (1926-1945) ISBN: 8842043427, Vol. 4, 1994, Dal dopoguerra alla nazionalizzazione 1945-1962 ISBN: 8842045314, Vol. 5, 1994, Gli sviluppi dell'Enel (1963 - 1990)*

[5] Zaleski E. *Planning for Economic Growth in the Soviet Union: 1918 - 1932.* 1ª edición. University of North Carolina Press, 2011. 464 p. ISBN 978-0807898123

[6] Bartolomé I, Lanciotti NS. "Análisis comparado de los sistemas eléctricos en España y Argentina,

1890-1950. Estrategias globales y experiencias divergentes de la electrificación en dos países de industrialización tardía" Documento de Trabajo de la Fundación Cajas de Ahorro (FUNCAS) 2011. 660, P. 1-53

[7] Sudriá C. "Un factor determinante: la energía", en *La economía española en el siglo XX. Una perspectiva histórica*, 5ª edición, Barcelona. Ariel. 1994, 379 p. ISBN 84-344-6559-0

[8] Sudriá, C. "La restricción energética al desarrollo económico de España". *Papeles de Economía Española*. 1997. Nº 73, P. 165- 188

[9] Carmona X, Nadal J. *El empeño industrial de Galicia. 250 años de Historia. 1750-2000.* 1ª edición. A Coruña. Fundación Pedro Barrié de la Maza. 2005. 443 p. ISBN 84-95892-38-3

[10] Garfield PJ, Lovejoy WF. *Public Utility Economics*, Englewood Cliffs. Prentice Hall.1964. 505 p. ISBN 978-0137393671

[11] Crew MA y Kleindorfer PR. *The economics of Public utility Regulation.* 1ª edición. 1987. Massachusetts. The MIT Press. ISBN 978-0262031271

[12] Palacín P. *El Sector Eléctrico Español de 1880 a 2005, su liberalización. Comparativa internacional.* 1ª edición. Barcelona. PPU. Promociones y Publicaciones Universitarias, S.A., 2007, 712 p. ISBN 978-84-477-0998-4

[13] Gómez Mendoza A. "UNESA y la autorregulación de la industria eléctrica, 1944-1973" en *Electra y el estado: la intervención pública en la industria eléctrica bajo el franquismo*, Vol. 1. 1ª edición. Madrid. CNE-Thomson Civitas, 2007. 645 p. ISBN 978-84-470-2710-1

[14] Pueyo J. "La regulación de la industria de producción y distribución de energía eléctrica en España, 1939-1972" en *Electra y el estado: la intervención pública en la industria eléctrica bajo el franquismo*, Vol. 1. 1ª edición. Madrid. CNE-Thomson Civitas. 2007. 645 p. ISBN 978-84-470-2710-1

[15] Sudriá, C. "La restricción energética al desarrollo económico de España". *Papeles de Economía Española*. 1997. Nº 73, P. 165- 188

[16] Sabugal S y Gómez F. *Centrales térmicas de ciclo combinado. Teoría y Proyecto.* 1ª edición. España. Editorial Diaz de Santos, 2006, 309 p. ISBN 84-7879-735-X

[17] Barquín J. *Energía: Técnica, Economía y Sociedad.* 1ª edición. Madrid. Universidad Pontificia de Comillas 2004, 289 p. ISBN 84-8468-134-3

[18] Sioshansi FP, *Evolution of Global Electricity Market.* 1ª edición. San Diego. Elsevier, 2013, 799 p. ISBN 978-0-12-397891-2

[19] Averch H., Johnson, LL. "Behaviour of the firm under regulatory constraint". *American Economic Review.* 1962 Vol. 52. P. 1052-1069

[20] Benavides J. (2007) "Precios, inversión y economía política de la energía eléctrica". *Revista de Ingeniería de la Universidad de Los Andes Colombia.* 2007. Nº 25, P. 122-129

[21] Fabra, N, Fabra J. "Competencia y poder de mercado en los mercados eléctricos". *Cuadernos económicos de ICE.* 2010. Nº 79, P. 17-43

[22] Serrano M, Bacigalupo M. *Cuestiones actuales del Derecho de la Energía. Regulación, Competencia y Control Judicial.* 1ª edición. Madrid. CNE, 2010, 290 p. ISBN9788498909910

[23] Directiva 96/92/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de diciembre de 1996 sobre normas comunes para el mercado interior de la electricidad. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas.* Bruselas, 19 de diciembre de 1996

[24] Directiva 2003/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 26 de junio de 2003 sobre normas comunes para el mercado interior de la electricidad. *Diario Oficial de la Unión Europea.* Bruselas. 26 de junio de 2003

[25] Directiva 2009/72/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de julio de 2009 sobre normas comunes para el mercado interior de la electricidad. *Diario Oficial de la Unión Europea.* Bruselas. 13 de julio de 2009

[26] Joskow PL. "California's electricity crisis". *Oxford Review of Economic Policy.* 2001. Vol. 17. Nº 3. P. 365-388. DOI: <http://dx.doi.org/10.1093/oxrep/17.3.365>

[27] Guerra I, Ballesteros M, Heras M R et al, *Fuentes de Energía para el futuro*, Madrid, MEPSYD, 2008, 325 p. ISBN9788436946758.

Laboratorio virtual de escenarios industriales para entrenamiento en las áreas de automatización y control

Virtual laboratory of industrial scenarios for training in the areas of automation and control

Jorge-Alberto Ortega-Moody¹, Róger-Ernesto Sánchez-Alonso², William R. Grisé¹, J.L. García-Malacara³, Ruth Vidana-Morales³ y Guillermo Reyes-Morales⁴

1 Morehead State University Department of Engineering and Technology Management (USA)

2 Universidad Nacional de Ingeniería (Nicaragua)

3 CINVESTAV Unidad Guadalajara (México)

4 Instituto Tecnológico Superior de San Andrés (México)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8051>

La incorporación de nuevas tecnologías y desarrollos tecnológicos en el área de automatización y control requiere de constante entrenamiento del personal involucrado en tal área. La mayoría de este tipo de entrenamiento inicia en los laboratorios de instituciones educativas y centros de entrenamiento. En estos laboratorios es donde el conocimiento teórico adquirido en los salones de clase es aplicado. Desafortunadamente, estos laboratorios poseen limitada infraestructura, y su uso, en el mejor de los escenarios, está restringido por la disponibilidad de algunos actuadores y sensores. Otra fuente de entrenamiento tiene lugar en la industria, donde las compañías mismas tienen su propio programa interno de entrenamiento impartido por expertos en el campo. Sin embargo, este método de entrenamiento no es siempre exitoso, pues cualquier error en la programación de los controladores puede poner personas en riesgo o implicar pérdidas económicas para la compañía.

Ya sea que el entrenamiento se realice en un ambiente educativo o industrial, el objetivo del aprendizaje es adquirir o actualizar sus conocimientos en una o muchas de las siguientes áreas:

- PLCs
- Diagrama escalera
- Programación en ambientes comerciales (AB: RsLogix, Siemens: Stp7, etc.)
- Comunicación
- OPC

- Modbus
- DLLs
- Protocolos comerciales (DeviceNet, ControlNet, Profibus, etc.)
- SCADAS comerciales (RSview32, Simatic, etc.)
- Desarrollo de SCADAS usando lenguajes de alto nivel (C#, VB.NET).

Actualmente, la disponibilidad de herramientas de alto desempeño tales como las plataformas para desarrollos virtuales, motores de física, procesadores de cómputo y procesadores gráficos, han contribuido al desarrollo de aplicaciones virtuales cuyo propósito, a diferencia de aplicaciones convencionales, va más allá del entretenimiento. Esta nueva tendencia tiene su principal campo de acción en la instrucción especializada y el entrenamiento [1], pues toma ventaja de videojuegos 3D y motores de física para mejorar la experiencia realista de usuarios en diferentes contextos, por ejemplo, industrial [2-4], sanitario [5-7], militar [8], etc.

Universidades alrededor del mundo han diseñado sus propios laboratorios virtuales tales como iLab [9] en el MIT, el cual soporta una gran variedad de laboratorios en línea pero requiere de conexión a internet. WebLabs [10] en la Universidad de Cambridge, WebLab-Deusto [11] en la Universidad de Deusto y NCSLab [12] permiten al usuario interactuar con dispositivos virtuales para crear un esquema de control que puede ser después probado en varios dispositivos y ofrecer varios servicios a usuarios alrededor del mundo, sin embargo los dispositivos físicos no pueden ser usados por todos los usuarios al mismo tiempo y los usuarios no pueden entrenar usando sus propios dispositivos.

Tomando en cuenta la necesidad de entrenamiento de calidad en las áreas de automatización y control, así como el crecimiento exponencial de herramientas de simulación 3D en tiempo real, surge el interés de desarrollar ambientes de entrenamiento virtual en estas disciplinas de la ingeniería.

Este trabajo presenta el desarrollo de laboratorios virtuales (LV) con escenarios industriales para su aplicación en la enseñanza de tópicos relacionados con automatización y control. Con este desarrollo, las instituciones educativas serán capaces de transferir conocimiento práctico sin la necesidad de adquirir hardware. Además, los alumnos serán capaces de automatizar líneas reales y procesos que actualmente existen en la industria, con escenarios cuyas secuencias variarán de complejidad de acuerdo al nivel de conocimiento del usuario. A través de la comunicación Modbus/TCP, estos escenarios industriales pueden ser usados junto con PLCs reales y al mismo tiempo interactuar con hardware real conectado a esos PLCs. De esta forma el usuario puede tomar ventaja de los dispositivos disponibles en el lugar donde es entrenado. Otra ventaja de esta herramienta es que provee al usuario la oportunidad de operar un proceso y simultáneamente elimina el riesgo económico y de seguridad que normalmente existe cuando los parámetros de control son alterados.

Este LV es capaz de interactuar con cualquier marca de PLC que tenga la capacidad de comunicarse por Modbus/TCP. Esto ofrece flexibilidad en la enseñanza de control industrial y automatización. El objetivo es crear un ambiente virtual basado en la simulación de procesos, donde los aspectos físicos y el comportamiento dinámico de modelos reales sean representados [13-17]. Esto incluye objetos, actuadores, sensores y factores ambientales.

Este desarrollo permitirá a las instituciones educativas y centros de entrenamiento ajustar su instrucción práctica con los tipos de controladores que existen en el mercado y así proveer preparación vocacional más apropiada para sus estudiantes. Los PLCs pueden también usar sus I/Os para conectarse con hardware externo (botones, joysticks, paneles de control, etc.) para manipular mecanismos y procesos dentro del escenario virtual. Esta flexibilidad hace el proceso de aprendizaje más similar a la realidad.

1. METODOLOGÍA

La metodología usada en el diseño es mostrada en la Fig. (1). Esta inicia con una serie de especificaciones del proceso a

virtualizar. Una vez que las características físicas son obtenidas del proceso, al igual que el comportamiento dinámico de cada elemento (mecanismos, sensores y actuadores) y su diseño CAD, el tercer paso es insertar los diseños CAD en el motor de física para asignar el comportamiento dinámico de cada elemento. Finalmente, el desempeño de cada elemento es probado para asegurar que su comportamiento se acerca lo más posible a la realidad.



Fig. 1: Metodología

2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

El laboratorio virtual es construido en dos bloques básicos de sensores y actuadores los cuales envían y reciben señales digitales al PLC. Estas señales son emuladas desde dispositivos virtuales tales como motores, pistones, HMIs, etc. El comportamiento de estos dispositivos depende del grado de sofisticación del modelo, el cual es comparado con el comportamiento de dispositivos físicos reales.

2.1. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

La comunicación entre el laboratorio virtual y los controladores externos es hecha a través del protocolo Modbus Server sobre TCP/IP. Es mediante tal comunicación que el acceso a las señales virtuales desde los sensores y actuadores virtuales es posible.

Los clientes (Controladores Externos) envían y reciben señales y comandos al servidor y continuamente actualizan el estatus y resultados de la simulación.

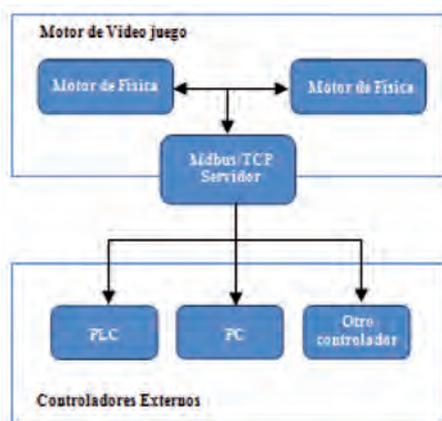


Fig. 2: Arquitectura del sistema

La simulación del comportamiento físico de los objetos es llevada a cabo por medio de un motor de física [18] independiente al servidor. Esto ayuda al servidor a no volverse lento debido a cálculos excesivos y lo libera para concentrarse en la comunicación con el cliente. Una representación esquemática de la arquitectura del sistema es mostrada en la Fig. (2).

2.2. IMPLEMENTACIÓN

Con respecto a la implementación, el escenario de una celda Robótica de manufactura fue seleccionada. En este escenario robots tipo Serie y tipo Delta fueron implementados. También, sensores capacitivos e inductivos, y actuadores como motores CD y pistones fueron virtualizados. Sonidos fueron añadidos a todos los equipos representando las características de los procesos y su función para crear un ambiente virtual ajustado a la realidad.

La otra tecnología utilizada es el motor de física, en este caso NVIDIA® PhysX®; uno de los motores de física comercialmente disponible más robustos. Un motor de física es un software que provee una simulación aproximada de ciertos sistemas físicos, tales como cuerpos rígidos, cuerpos flexibles y fluidos. Esto significa que a través de un motor de física el comportamiento real de todos los sistemas embebidos en el escenario puede ser representado con precisión. En el caso de las celdas robóticas, los sistemas físicos representados son sólo los cuerpos rígidos. Un motor de física provee la oportunidad de configurar muchas características para simular el comportamiento de cuerpos rígidos incluyendo gravedad, detección de colisiones, masa, centro de masa, velocidades y aceleraciones angulares, fuerzas, torques, etc. La tecnología anteriormente mencionada aunada al modelado de sistemas dinámicos resulta en un conjunto de escenarios con un elevado grado de realismo en el comportamiento de todos los sistemas embebidos en el ambiente virtual.

2.3. TIPOS DE ENTRENAMIENTO

Dos tipos de entrenamiento fueron implementados: entrenamiento en el cuarto de control y entrenamiento en la planta. El primero consiste en la recreación y simulación de un cuarto de control donde el operador monitorea la planta usando un sistema SCADA y programa los PLCs. Por lo tanto, el ambiente consiste en las pantallas y controles necesarios para manipular la operación del proceso. De igual forma es posible simular cámaras de seguridad que monitoreen la planta. Un ejemplo de este tipo de entrenamiento es mostrado en la Fig. (3).

La segunda forma de entrenamiento es dentro de la planta misma. Este modo es usado cuando el ingeniero de campo debe interactuar con los objetos que son parte de la escena, tales como botones e interfaces. En este modo, el ingeniero de campo se mueve a través de la planta en primera persona, ofreciendo al aprendiz la perspectiva de estar dentro de un ambiente industrial tal y como se muestra en la Fig. (4 y 5).



Fig. 3: Cuarto de control virtual



Fig. 4: Vista en primera persona



Fig. 5: Manipulación de objetos en primera persona

El LV permite entrenar en ambos modos simultáneamente. Un operador puede usar el modo de cuarto de control mientras un ingeniero de campo entrena en la escena. Vale la pena mencionar que tal interacción en el escenario virtual se puede realizar en red incluso cuando los participantes estén localizados en diferentes partes del mundo. Al aplicar ambos modos simultáneamente, el operador puede visualizar el avatar del ingeniero de campo que está entrenando y moviéndose dentro de la escena, tal y como se muestra en la Fig. (6) (izquierda). La Fig. (6) (derecha) muestra la interfaz interactiva para visuali-



Fig. 6: a) Vista en tercera persona. b) Interfaz interactiva del robot Delta.

lizar y modificar los parámetros dinámicos de uno de los robots Delta. Esta interfaz es la forma manual en la que el usuario puede controlar los movimientos del robot como en un *teach pendant*.

La automatización de la planta virtual de robótica industrial tiene lugar programando un PLC con todas las rutinas para cada componente industrial. Para tal fin se utilizó el *Rockwell Automation RS Logix 500*. En el escenario virtual propuesto la tarea del usuario es programar el PLC, probar la rutina programada y hacer correcciones si fueran necesarias. El objetivo del ejercicio de entrenamiento es obtener una planta industrial virtual completamente funcional.

2.4. PRUEBAS Y RESULTADOS

El PLC que fue utilizado para interactuar con el LV fue el SLC 500 el cual se comunica mediante Modbus/TCP. El modelo gráfico está hecho de 0.8 millones de polígonos. Hablando en términos de la simulación física, el modelo está hecho de 50 cuerpos rígidos con 40 regiones de colisión.

El software y los módulos de comunicación fueron ejecutados usando una computadora con 6.00 GB de RAM con un procesador Intel i5-4210U @ 2.40GHz, Windows 8.1 64 bits.

El uso del CPU/GPU fue constante e inferior al 21% en total. La frecuencia de muestreo de las señales del modelo fue mantenida constante en 0.2 milisegundos.

3. CONCLUSIONES

El LV implementado es una herramienta de enseñanza para entrenar operadores de planta, ingenieros de campo y estudiantes en un ambiente virtual utilizando controladores reales. Esta última característica ofrece a los estudiantes la oportunidad de aprender e implementar rutinas de automatización en procesos complejos con la certeza de que no se está comprometiendo la seguridad de las instalaciones ni la del personal involucrado.

Basándose en la retroalimentación del sistema, el operador puede visualizar

los errores en el proceso. Esto ayuda a los usuarios a realizar cambios en los parámetros de manera que ellos puedan aprender de sus propios errores.

Actualmente, la aplicación virtual está en desarrollo, y la primera versión comercial disponible se planea sea lanzada próximamente. Los trabajos futuros para este desarrollo tecnológico están orientados en dos direcciones: (i) nuevos escenarios con procesos industriales más complejos serán diseñados, modelados y virtualizados para ofrecer un rango más completo de herramientas para el entrenamiento, y (ii) temáticas relacionadas con incrementar la experiencia realista de los usuarios, no sólo desde la perspectiva del desarrollo de mejores gráficos, contraste, audio, etc. Sino también a través de la incorporación de nuevas tecnologías, tales como cascos de realidad virtual, lo cual constituye opciones bastante viables para proveer al usuario la sensación de estar completamente inmerso en el ambiente virtual.

PARA SABER MÁS

- [1] Zyda M. "From visual simulation to virtual reality to games", Computer. September 2005. Vol. 38-9, P. 25-32. (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/MC.2005.297>).
- [2] Saraiva Brasil I., et al. "An intelligent and persistent browser-based game for oil drilling operators training", In: Serious Games and Applications for Health (SeGAH), 2011 IEEE 1st International Conference on. IEEE, 2011. (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/SeGAH.2011.6165431>).
- [3] Guo H., et al. "Using game technologies to improve the safety of construction plant operations", Accident Analysis & Prevention. September 2012. Vol. 48, P. 204-213. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2011.06.002>).
- [4] Jia L., et al. "Simulation for pre-visualizing and tuning lighting controller behavior", Energy and Buildings. February 2014. Vol. 70, P. 287-302. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.063>).
- [5] El Khayat, G.A., et al. "Intelligent serious games system for children with learning disabilities", In: Computer Games (CGAMES), 2012 17th International Conference on. IEEE, 2012. (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/CGames.2012.6314547>).
- [6] Lancaster R.J. "Serious game simulation as a teaching strategy in pharmacology", Clinical Simulation in Nursing. March 2014. Vol. 10-3, P. 129-137. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.j.ecns.2013.10.005>).

- [7] Sliney A. and Murphy D. "JDoc: a serious game for medical learning", In: Advances in Computer-Human Interaction, 2008 First International Conference on. IEEE, 2008. (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/ACHI.2008.50>).
- [8] da Silva P.D and Ferreira C.G.I. "Military war games edutainment", In: Serious Games and Applications for Health (SeGAH), 2011 IEEE 1st International Conference on. IEEE, 2011. (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/SeGAH.2011.6165433>).
- [9] Harward V.J, et al. "The iLabShared Architecture: A Web Services Infrastructure to Build Communities of Internet Accessible Laboratories", In: Proceedings of the IEEE. 2008. Vol. 96-6, P. 931-950. (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2008.921607>).
- [10] Richter Th., et al. "The WebLabs of the University of Cambridge: A study of securing remote instrumentation", In: Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), 2012 9th International Conference on. IEEE, 2012. (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/REV.2012.6293099>).
- [11] Garcia-Zubia J., et al. "Addressing Software Impact in the Design of Remote Laboratories", Industrial Electronics, IEEE Transactions on. January 2010. Vol. 56-12, P. 4757-4767. (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2009.2026368>).
- [12] Yuliang Q., et al. "NCSLab: A Web-Based Global-Scale Control Laboratory With Rich Interactive Features", Industrial Electronics, IEEE Transactions on, June 2009. Vol. 57-10, P. 3253-3265.
- [13] Liu Y. and He X. "Modeling identification of power plant thermal process based on PSO algorithm", In: American Control Conference, 2005. Proceedings of the 2005. IEEE, 2005. (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/ACC.2005.1470703>).
- [14] Conte J.P. and Trombetti T.L. "Linear dynamic modeling of a uni-axial servo-hydraulic shaking table system", Earthquake engineering & Structural dynamics. September 2000. Vol. 29-9, P. 1375-1404. (doi: [http://dx.doi.org/10.1002/1096-9845\(200009\)29:9<1375::AID-EQE975>3.0.CO;2-3](http://dx.doi.org/10.1002/1096-9845(200009)29:9<1375::AID-EQE975>3.0.CO;2-3)).
- [15] Bhat N.V., et al. "Modeling chemical process systems via neural computation", IEEE Control Systems Magazine. April 1990. Vol. 10-3, P. 24-30. (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/37.55120>).
- [16] Ekanayake, J. B., et al. "Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines", IEEE Transactions on Power Systems. May 2003. Vol. 18-2, P. 803-809. (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRS.2003.811178>).
- [17] Sandhu K.S. and Vivek P. "Simulation Study of Three-Phase Induction Motor with Variations in Moment of Inertia", Journal of Engineering and Applied Sciences. August 2009. Vol. 4-6, P. 72.
- [18] Boeing A. and Thomas B. "Evaluation of real-time physics simulation systems." In: Proceedings of the 5th international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australia and Southeast Asia. 2007. (doi: <http://dx.doi.org/10.1145/1321261.1321312>).

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto de investigación fue apoyado por Mechatraining LLC.

Realidad aumentada: aplicaciones en los negocios y la educación

Augmented reality: applications in business and education

Andrea Bellezza¹, Valeria Caggiano², Jerónimo González-Bernal¹, Raquel de-la-Fuente-Anuncibay¹ y Javier Sedano³

¹ Universidad de Burgos (España)

² Università degli Studi Roma III (Italia)

³ Instituto Tecnológico de Castilla y León (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8066>

1. INTRODUCCIÓN

Con el término *Aprendizaje Aumentado* nos referimos a un enfoque de aprendizaje que presenta una gran demanda; la característica fundamental de ésta es que el ambiente y proceso de aprendizaje se adapte a cada estudiante. Como resultado de nuevas tecnologías, la terminología se asocia generalmente a soluciones innovadoras para la educación y formación, a nuevos enfoques y a modos diversos de aprendizaje.

Como parte importante de este cambio aparece la realidad aumentada (RA), auge que se observa en distintos entornos tanto educativos como empresariales.

En relación a su impacto, potencial y evolución, es necesario revisar referencias fundamentales pioneras, sin olvidar analizar las publicaciones más recientes. Resulta interesante citar la literatura [1] que proporciona una revisión crítica de los estudios existentes, centrándose en las posibles aplicaciones y ventajas. Los expertos afirman el gran potencial de la tecnología de realidad aumentada (RA) en los estudiantes para aprender, principalmente por la participación directa que hace que los estudiantes sean protagonistas activos en el proceso de aprendizaje. En comparación con otras tecnologías, la realidad aumentada tiene una gran capacidad para estimular la meta-cognición, la capacidad de comprender y el pensamiento crítico, y todo esto es posible debido a que este tipo de tecnología introduce elementos virtuales en la interacción natural, y en tiempo real, permitiendo experiencias de educación real muy activa. Por otro lado, la aplicación de la RA se extiende a muchos

campos del conocimiento, como áreas de astronomía, química, biología, medicina, física, matemáticas y así sucesivamente. El potencial que la RA tiene en educación se confirma por las ventajas, y también por los límites lo que permite orientar las futuras investigaciones en este ámbito. A partir del examen y revisión de más de 30 estudios previos [2], se constata el creciente interés por la RA como un instrumento para la creación de un único tipo de aprendizaje. Otra visión [3] del tema se formula en el análisis de 26 estudios de los que extrae una lista de efectos positivos y negativos relacionados con el uso de realidad aumentada en relación con la experiencia de aprendizaje; lo que lleva al autor a expresar una opinión positiva en características como la inmediatez, la accesibilidad, y la interactividad de la realidad aumentada.

Publicaciones más recientes [4] han sistematizado el uso de la realidad aumentada en el campo de la educación a través de 25 estudios. Con respecto a lo que ha sido definido una nueva tecnología capaz de dar más oportunidades en la educación, los investigadores individualizan una amplia gama de beneficios, divididos en diferentes apartados; de este modo, señalan que son principalmente las aplicaciones las que determinan estos beneficios, aumentando la motivación del aprendizaje. La revisión de la bibliografía existente, centrada en aplicaciones móviles, resalta los resultados positivos de las aplicaciones de realidad aumentada en soluciones educativas que demuestran un incremento del interés del alumno y una mejora de la capacidad de aprendizaje [5].

En el campo de la educación destacan algunas pautas aplicables, en particular cinco usos fundamentales: *libros en AR*-textos con páginas y secciones con contenido 3D y animaciones de realidad aumentada, *juegos educativos en AR*-aplicaciones de entretenimiento que estimulan de una manera creativa el aprendizaje, *aprendizaje basado en el descubrimiento*, experiencias de

aprendizaje fundado en la exploración de entornos y espacios reales, *modulación y configuración de objetos y ambientes* y *capacitación*, aplicada a contextos de aprendizaje interactivo. La valoración empírica de estos beneficios es importante porque la realidad aumentada genera experiencias educativas que estimulan capacidades como [3]: habilidad espacial, memoria a largo plazo, enfoques de colaboración y motivación. Podemos clasificar estos beneficios, de una manera más estructurada en seis grupos principales [4]:

1. Beneficios relacionados con lo cognitivo, que se refieren al aumento de motivación, atención, concentración y satisfacción;
2. Beneficios relacionados con el concepto de aprendizaje;
3. Beneficios relacionados con la comunicación;
4. Beneficios vinculados directamente al aprendizaje, entre los cuales es importante destacar la mejora de las curvas de aprendizaje y mayor creatividad simulada en los estudiantes;
5. Beneficios relacionadas con la comprensión de contenidos;
6. Beneficios con respecto a la disminución de los costos.

Sin un particular rigor en la clasificación, pero con profundidad, [1] la literatura existente al respecto, ha identificado una serie de efectos beneficiosos al aplicar la realidad aumentada en el contexto educativo como exceder de los límites espaciales y temporales de clase, desarrollo de canales amplios de aprendizaje, uso de interfaces naturales y tangibles con una alta potencia semántica en la visualización de detalles y contenido 3D interactivo. A este respecto, los estudios [1] confirman: mejora de rendimiento de aprendizaje, aumento de la motivación, interacción fácil e inmediata, orientación colaborativa, participación directa y experiencia interactiva, información 'justo a tiempo', aprendizaje contextual, enfoque centrado en el estudiante, aumento de la atención, aumento de la diversión, aumento de la curiosidad y la inclinación a explorar, incremento de la capacidad de innovación, disminución de costos, contribución hacia actitudes positivas, entre otras.

Sin embargo es importante puntualizar algunos límites de la realidad aumentada en su aplicación al ámbito educativo, ya que implican inversiones iniciales considerables en cuanto a tiempo y conocimiento, especificidad de las aplicaciones, alta complejidad de creación autónoma de contenidos, dificultad de seguimiento y representación en tiempo real, experiencia de la complejidad de algunos aspectos del usuario, riesgo que se monopolice la atención hacia el contenido virtual, ya que es la otra cara de la alta capacidad de atracción, así como dificultad de profundizar y de organizar sesiones largas. Cabe señalar algunas limitaciones encontradas en la revisión sobre investigaciones realizadas, como la latencia relativamente baja, con ciclos de períodos cortos o medianos y muestras muy pequeñas de la mayoría de los estudios analizados.

La realidad aumentada no puede dejar de lado la narración de la trayectoria educativa [6], por el contrario tiene idiomas, experiencias, interfaces y nuevos desarrollos. Una adecuada mejora de la experiencia educativa conduce a nuevos niveles semánticos, a la exploración de un potencial desconocido, estética multi-sensorial y el desarrollo de la integración e audio. Esta apreciación se realiza gracias a nuevos métodos y técnicas para la creación de entornos y contenidos de aprendizaje en realidad aumentada [7]. En este sentido, más allá de la comprensión de cuáles son las soluciones más adecuadas, las habilidades a desarrollar y la distinción de la experiencia, se trata de llegar a una mayor participación de los usuarios y obtener un mejor *feedback*.

Por lo que respecta al entorno empresarial, tras muchos años de investigación y desarrollo en laboratorios, la RA ha sido lanzada como una potente herramienta de marketing. En tan sólo un año, llegó a la confirmación en el mercado obteniendo en 2010 la consagración y el consiguiente pico de expectativa inflada. [8] Se prevé una facturación de AR-VR en el 2025 entre \$ 80 billones y \$ 182 billones. Desde un punto de vista económico, las medidas e ingresos actuales se refieren principalmente a la aplicación de realidad aumentada en campañas, como podemos observar en los ejemplos de las historias de éxito señaladas a continuación (colaboración directa con la empresa *Total Immersion*, 2014).

La innovación es la clave para acelerar el juego de transición a lo digital, un paso ineludible para todas las organizaciones contemporáneas. *Mc Donald* ha

adoptado realidad aumentada para ofrecer regalos digitales en las buenas prácticas promocionales. El resultado fue un incremento del 20%, sobre precio final, de las ventas en un periodo de tres meses. *Sosro* utiliza RA para ofrecer una experiencia interactiva en la tienda, obteniendo un incremento del 400% de las ventas. *Paramount* compromete a los usuarios con RA para la puesta en marcha de transformadores, con un retorno de 2M de visitas en el sitio Web. *AtoI* obtuvo un más de un 50% de visitantes durante la campaña de AR.

Por otro lado, la innovación puede mejorar la eficacia de costo ya que es posible mostrar de manera virtual lo que no puede verse de una manera real, y se puede digitalizar la información del producto para reducir los gastos de impresión. *Alstom* ahorró 100k € usando modelos de tamaño natural y animación realista en lugar de objetos reales durante anuncios. *Nissan* y *Citroen* habían ahorrado el 30% de los gastos de papel con una campaña digital. Además, la innovación puede aumentar la imagen y posición percibida del mercado. *KIA Motors* realizó un *adver-game* en Facebook y adquirió 50.000 conductores calificados por el efecto viral de la campaña digital; *Yahoo*, *Nokia*, *Coca-Cola*, *Topps* y muchos otros lograron en general una estancia media en páginas de web de juego de realidad aumentada entre 7 y 11 minutos versus los 2-3 minutos tradicionales.

Exponemos a continuación un estudio que puntualiza el concepto de realidad aumentada, se analizan distintas tecnologías y aplicaciones, y se presentan ejemplos de casos relevantes haciendo una breve reseña sobre ellos.

2. METODOLOGÍA

Se realiza una investigación cualitativa a partir de datos disponibles de fuentes secundarias. Se consultan y utilizan distintas fuentes: entrevistas con expertos académicos, y sitios web certificados, que cumplen los criterios de estar autorizados, ser confiables y objetivos, pertinentes científicamente y que cumplen con todas las convenciones pertinentes para ser considerados como una fuente fiable. La duración de la investigación fue de ocho meses y se inició en julio de 2015.

¿Cómo funciona la realidad aumentada?

La realidad aumentada mezcla en realidad, en tiempo real, lo que podemos ver a nuestro alrededor con contenido 3D digital. Funciona a través de un software con dos 'motores': el primero de ellos es capaz de rastrear y reconocer la realidad, con una cámara óptica o infrarrojos; el otro es capaz de renderizar en 2D y 3D el contenido relacionado con escenas y objetos reales.

Gracias a diversos dispositivos, como pantallas o proyectores, pc, Smartphone, o tabletas, los usuarios pueden percibir el efecto final de un híbrido que mezcla la realidad, de ahí el nombre de 'realidad aumentada'. La realidad aumentada puede ser aplicada no sólo a la visión, sino a través otros sentidos también, como oído, olfato y tacto.

El término '*realidad aumentada*' fue concebido en 1990 por Thomas Caudell, que en aquel momento trabajaba como científico en la industria de la computación de *Boeing*. Utilizó las palabras 'realidad aumentada' para describir una pantalla digital que inserta elementos gráficos

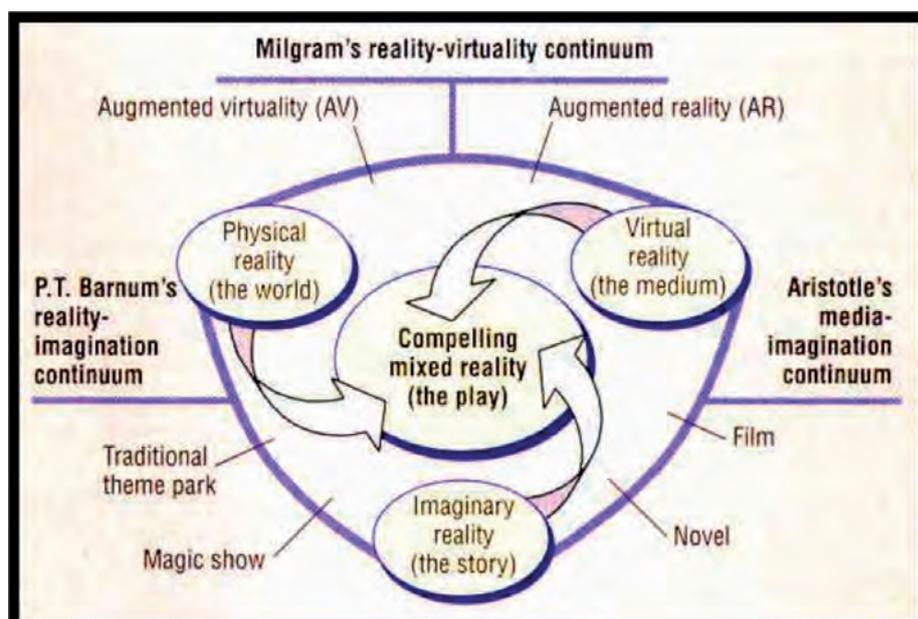


Figura 1: Marco de fantasía mezclada (gráficos de computadora y aplicaciones, IEEE, 25(6), 24-30)

virtuales, en su mayoría instrucciones de montaje, en la realidad física. En este sentido, Paul Milgram y Fumio Kishino consideran la realidad aumentada como una parte de un concepto más amplio de la *realidad mezclada* (RM.). Los dos investigadores consideran los conceptos de realidad aumentada y realidad virtual como un continuo entre ellos. El concepto de *continuum virtual*, realizado por estos autores, puede vincularse como un continuum de imaginación-realidad de Barnum y el continuo de imaginación de Aristóteles para localizar muchos fenómenos de los medios de comunicación y para entender cómo contar historias y entretener a la gente en entornos de realidad mezclada [9].

PT Barnum es un *showman* moderno. Él sabe cómo activar a la gente y sabe cómo transformar la percepción de la realidad. La Poética de Aristóteles se basa en la idea de que no es la función del poeta decir lo que ha sucedido, pero sí lo que puede suceder. Aristóteles utiliza estructuras especiales para encender al público. Ambos enfoques pueden utilizarse para construir mundos fantásticos en los que el usuario no diferencia la fantasía de la realidad, a través de la imaginación y la suspensión de la incredulidad.

3.1 EJEMPLOS

Se han recogido directamente un gran número de casos de aplicación de RA. Uno de los campos más innovadores e interesantes es sin duda el mundo del motor, con proyectos directos para marcas como *Ferrari*, *Maseratti*, *Mercedes* y *Renault*.

Los usuarios pueden ver el modelo 3D del coche en sus escenarios reales, que aparecen en un folleto, o incluso en escala real, en el trayecto cerca de su garaje. La tecnología de la realidad aumentada puede utilizarse para crear, configurar y comunicar modelos y accesorios en la industria del automóvil, modelos virtuales en escenarios reales o modelos reales con configuración virtual y pueden ser experimentados directamente por los consumidores, con un alto nivel de interacción. Teniendo en cuenta la tendencia de los juegos en la comercialización, las marcas utilizan cada vez más la realidad aumentada para involucrar a los usuarios en juegos interactivos relacionados con contenido real, como *American Express* que ha llevado a cabo un juego de realidad aumentada para promover su nuevo catálogo de premios.

La realidad aumentada además, es capaz de añadir más niveles semánticos

a la realidad siendo extremadamente funcional y efectiva: desde 2010 a 2015 se

trabajó, para marcas de *Luxottica Ray-Ban*, *Persol* y *SGH*, 'Magic virtual Mirror'. Sirva



Figura 2: Ejemplo de aplicación móvil RA para Renault (archivo de antecedentes OSC)



Figura 3: Ejemplo de aplicación de quiosco de RA para American Express (archivo de antecedentes OSC)



Figura 4: Ejemplo de RA, aplicación independiente para la Abadía de Cluny (archivo de historia de inmersión Total)

como ejemplo que gracias a esta solución de realidad aumentada, los usuarios pueden utilizar gafas de sol en tiempo real, con la selección y configuración, y comparar simultáneamente hasta cuatro pares diferentes. Con esta aplicación, se registró un aumento en la satisfacción del cliente y, sobre todo, una mayor conversión en compra.

Con respecto al ámbito cultural también la experiencia se ha ido acercando cada vez más, los principios estaban referidos a las áreas del arte y la cultura. En los proyectos de *'Anastilos virtual digital'* se constituyen además como pertinentes y eficaces. Gracias a la realidad aumentada es posible reconstruir virtualmente antiguos

para importantes marcas y organizaciones involucradas en la industria médica y farmacéutica. En este sentido el objetivo no es un usuario general común o consumidor, sino un médico especializado, y la conversión ya no se basa en una acción de compra, sino que, como en los proyectos de educación o formación, la conversión se basa en las curvas de aprendizaje. Un caso de la nuestra que se mueve en esta dirección es el evento en vivo del *Amici di Brugg*. Ésta es la más antigua asociación de cirugía dental de Europa y, durante una presentación científica, algunos expertos mostraban contenidos reproducidos en 3D interactivo en tiempo real. Durante la exposición de estos elementos 3D son animados, simulando los procedimientos. El éxito se refleja en la sorpresa de los destinatarios y en los buenos resultados de aprendizaje.

Como ya hemos señalado, uno de los mayores intereses de la aplicación y la nueva raíz de la investigación en términos de educación innovadora, es el uso de la realidad aumentada, para actividades educativas y formativas.

La realidad aumentada adquiere el máximo impacto cuando se aplica en plataformas y aplicaciones de *'aprender haciendo'* y *'formación en el trabajo'*. Gracias a la realidad aumentada se puede enseñar y comprobar en el mismo momento, apoyando acciones concretas, los procesos en tiempo real y experimentar una nueva forma de hacer en términos de formación y aprendizaje. La RA puede seguir en vivo las operaciones reales, bien con objetos físicos reales o para conseguir procesos formativos; esto significa que las aplicaciones RA se modifican según las necesidades y requisitos de situaciones individuales, además pueden ser un instrumento de apoyo de las líneas de producción, las actividades de mantenimiento, o una operación de cirugía delicada, así como muchas otras actividades simples o complejas.

Se ha señalado que el mayor impacto y eficacia se obtiene en su aplicación sobre experiencias de aprendizaje realizando actividades así como la *'formación en el trabajo'*, a partir de soluciones personalizadas, dentro de su contexto laboral y el modo de *'justo a tiempo'*. Gracias a la integración de la RA, se puede enseñar, apoyar y controlar en tiempo real, acciones y procesos, que son más o menos complejos. Esto significa experimentar un nuevo camino en cuanto a los procesos formativos, estimular, provocar y controlar los procesos entre personas, entornos y objetos físicos reales, tanto durante las

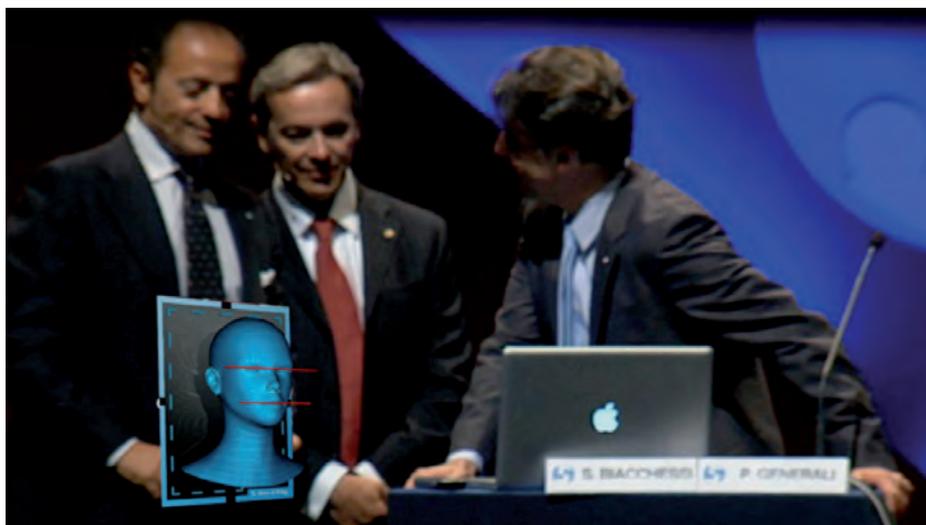


Figura 5: Ejemplo de solicitud de evento en vivo de RA de Amici di Brugg (archivo de antecedentes OSC)



Figura 6: Ejemplo de aplicación de la web de RA para la industria farmacéutica (archivo de antecedentes OSC)

Otro ejemplo que ha revolucionado la adhesión a la RA es la aparición de los nuevos *Pokemon Go* de realidad aumentada, juego que apareció a finales de junio de 2016 y tomó el mercado como una tormenta, provocando una súbita ganancia para Nintendo de 7.000 millones de euros, se calcula que más de 10 millones de personas juegan a pokemon en los territorios anglosajones comercializados. El juego tan esperado, fue un gran éxito debido a su alta dependencia de realidad aumentada. Este es el ejemplo más reciente y exitoso de RA [10, 11, 12].

edificios y monumentos. Como ejemplo en el proyecto de la Abadía de Cluny, cerca de cruce de la iglesia, hay una pantalla móvil que muestra cómo sería el resto de la iglesia si no hubiera sido destruida. Los resultados se observan en que se ha registrado un incremento en el número de visitantes y las personas manifiestan comprometerse emocionalmente.

Siguiendo el análisis de aplicaciones, se puede observar también el poder de la realidad aumentada en su aplicación en distintos campos científicos. Así nos referimos a ejemplos en los se trabaja

operaciones reales, como en las sesiones de entrenamiento.

4. CONCLUSIONES

El aprendizaje aumentado y la RA como soluciones de procesos formativos representan una nueva frontera, no sólo en el ámbito empresarial, sino también en esferas culturales, científicas, en la investigación, y en mayor grado si cabe, en la educación. Sin embargo, aún existe un campo amplio y desconocido por explorar, con el fin de utilizar plenamente el potencial de este nuevo recurso. Es necesario entender cómo estas experiencias interactivas que se iniciaron en los medios de comunicación pueden transformarse en experiencias, y cómo influyen fuertemente en procesos cognitivos y emocionales durante nuestras actividades. Las aplicaciones de RA no dedicarse, en una gran proporción, exclusivamente al entretenimiento y el ocio, esto solo refleja una forma sesgada e infravalorada de su potencial, por lo que es importante dirigir los esfuerzos hacia aplicaciones innovadoras y como vehículo de formación generalizada.

Aunque menos conocidos, señalamos algunos aspectos y tendencias que pueden orientar nuevos estudios y desarrollos sobre este tema:

- Integración tecnológica, la tendencia 'AVR', que combina 'AR-VR-IOT', fusión de la realidad aumentada y realidad virtual inmersiva, 360 °, e internet. Se apoyan en una potente gama de dispositivos portátiles de nueva generación. Pueden constituir una nueva tendencia de los medios

de comunicación, creando caminos que van más allá de hipertexto con nuevas construcciones.

- La tendencia 'dilog', un término que fusiona dos palabras analógicas y digitales, que enfoca el interés hacia experiencias naturales y las interfaces corporales; es un movimiento en el que la investigación aplicada digital parece dispuesta a combinarse con la representación analógica y su naturalidad.
- Contenidos 'RA UGC', significan realidad aumentada y usuario que genera contenido, imaginado y realizado directamente por profesores y alumnos. La educación es uno de los campos más rentable para aplicar la realidad aumentada, con el fin de mejorar las actividades didácticas y todos los procesos de aprendizaje.

PARA SABER MÁS

[1] Saidin, N. F., Halim, N. D. A., & Yahaya, N. (2015). A Review of Research on Augmented Reality in Education: Advantages and Applications. *International Education Studies*, 8(13), 1. DOI: <http://dx.doi.org/10.5539/ies.v8n13p1>

[2] Bacca, J., Baldiris, S., Fabregat, R., Graf S., & Kinshuk (2014). Augmented reality trends in education: a systematic review of research and applications. *Journal of Educational Technology & Society*, 17(4), 133. ISSN 1436-4522 (online) and 1176-3647 (print).

[3] Radu, I. (2014). Augmented reality in education: a meta-review and cross-media analysis. *Personal and Ubiquitous Computing*, 18(6), 1533-1543.

[4] Diegmann, P., Schmidt-Kraepelin, M., Van den Eynden, S., & Basten, D. (2015). Benefits of Augmented Reality in Educational Environments-A Systematic Literature Review. In *Wirtschaftsinformatik*. 1542-1556.

[5] Yang, Y. (2015). Application of Mobile AR in E-learning: An Overview. In *Transactions on Edutainment XI* (pp. 141-155). Springer Berlin Heidelberg.

[6] Johnson, L., Adams Becker, S., Estrada, V., & Freeman, A. (2014). *NMC Horizon Report: 2014 library edition*. Austin, Texas. The New Media Consortium.

[7] Wojciechowski, R., & Cellary, W. (2013). Evaluation of learners' attitude toward learning in ARIES augmented reality environments. *Computers & Education*, 68, 570-585.

[8] The Goldman Sachs Group Inc. (2016). Profiles in Innovation. *Virtual & Augmented Reality*. Retrieved January 28, 2016 from <http://www.goldmansachs.com/our-thinking/pages/technology-driving-innovation-folder/virtual-and-augmented-reality/report.pdf>

[9] Hughes, C. E., Stapleton, C. B., Hughes, D. E., & Smith, E. M. (2005). Mixed reality in education, entertainment, and training. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 25(6), 24-30

[10] Greenemeier, L. (2016). *Scientific American*. Is Pokemon Go Really Augmented Reality?. [Online]. Available at: <http://www.scientificamerican.com/article/is-pokemon-go-really-augmented-reality/> (Accessed at 20th July).

[11] Larruscain-Sarasola, J., Rodríguez-Andara, A. (2015). M-LEARNING IN VOCATIONAL TRAINING: USE AND TRAINING NEEDS AMONG TEACHERS. *DYNA New Technologies*, 2(1). 1-18. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT7677>

[12] HERNÁNDEZ-ALAVA, José-María. PROMISING NEW DISCIPLINES IN ENGINEERING. *DYNA New Technologies*, Enero-Diciembre 2014, vol. 1, no. 1, p.[1 p.].

DYNA

Ingeniería e Industria



Suscríbete a Revista Dyna

Revista técnico científica de ingeniería multidisciplinar desde 1926

Los mejores artículos en español para investigadores y profesionales de la ingeniería.

Mantente actualizado y conoce el estado del arte en ingeniería.

PROMOCIÓN PARA COLEGIADOS:

La suscripción a DYNA impresa incluye la suscripción digital a DYNA y a otras 3 revistas especializadas:

- DYNA Energía y Sostenibilidad (DYNAES)

- DYNA Management (DYNAMN)

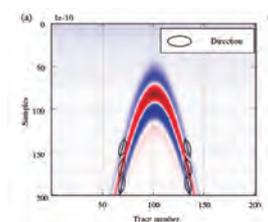
- DYNA Nuevas Tecnologías (DYNANT)

Suscripción Impresa + 4 revistas digitales 48 €/año

Para acogerse a esta promoción escribanos a dyna@revistadyna.com (o llame al 944 237 566) indicando su colegio y número de colegiado.



Analysis on directional feature extraction for the target identification of shallow subsurface based on curvelet transform



Análisis de extracción de función direccional para la identificación de objetos a baja profundidad en el subsuelo basado en transformada curvelet



Yong Yang^{1,2,*}, Weigang Zhao², Yanliang Du² and Hao Zhang^{2,3}

* Corresponding author

¹ School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, No.3 Shangyuancun, Haidian District, 100044, Beijing, China, email: sherry_0768@163.com

² The Key Laboratory for Health Monitoring and Control of Large Structures in Hebei Province, Shijiazhuang Tiedao University, 17 Northeast, Second Inner Ring, Shijiazhuang, 050043, Hebei, China

³ Department of Urban & Civil Engineering, Ibaraki University, 4-12-1, Nakanarusawa 316-8511, Hitachi, Japan

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8326> | Recibido: 23/10/2016 • Evaluado: 27/01/2017 • Aceptado: 03/04/2017

RESUMEN

- La extracción de imágenes es clave para detectar e identificar objetivos someros del firme en ferrocarril por medio del georadar (GPR). Obtener imágenes apropiadas para reconocer objetivos subsuperficiales es difícil, debido a la complejidad de las estructuras sub-superficiales y la diversidad de ecos de objetivos. Para identificar esos objetivos con eficacia y eficiencia, este estudio propone un método para extracción de imagen estadístico de la energía basado en la imagen direccional del eco del objetivo. Se crearon inicialmente modelos direccionales del eco de un objetivo típico de subsuperficies someras. Se discutió la imagen direccional para diferentes ecos de objetivos. La dirección de la asíntota hiperbólica y del horizonte fueron las mayores imágenes direccionales del eco de objetivo. Se concluyó con un método de clasificación de objetivos basado en la dirección del eco. En base al análisis de la relación entre el coeficiente de Curvelet y la imagen estadística de energía en diferentes direcciones, se presentó un método de extracción de imagen para formar un vector sub-espacial de imagen. Finalmente, la clasificación y reconocimiento de objetivos se consiguió usando el método del vecino más próximo. Los resultados muestran que el método propuesto puede identificar efectivamente los problemas de huecos pre-introducidos en el firme de ferrocarriles. La precisión de la detección cumple los requisitos para la identificación de defectos en las vías de ferrocarriles. El método utilizado en este estudio no era sensible a la fase eco y era adecuado para detectar ecos de objetivos a 0° y 180° de la fase. El método propuesto facilita nuevos medios para identificar defectos en firmes de ferrocarril y es significativo para desarrollar una tecnología automática para la detección de objetivos sub-superficiales basada en GPR.
- **Palabras clave:** Radar de penetración en el suelo, georadar, Imagen direccional, Transformada de Curvelet, Método del vecino más próximo, Defectos en el firme de ferrocarriles.

ABSTRACT

Feature extraction is the key for detecting and identifying subgrade shallow targets of railways through ground-penetrating radar (GPR). Obtaining the appropriate feature to recognize subsurface targets is difficult due to the complication of subsurface structures and the diversity of target echoes. To identify those targets effectively and efficiently, this study proposes an energy sta-

tistical feature extraction method based on the directional feature of a target echo. Directional models of a typical target echo of shallow subsurface were initially built. The directional feature of different target echoes was discussed. The direction of the hyperbolic asymptote and horizon were the major directional features in the target echo. A target classification method based on echo direction was summarized. On the basis of the analysis of the relationship between curvelet coefficient and statistical features of energy in different directions, a feature extraction method was presented to form a feature vector subspace. Finally, target classification and recognition were achieved using the nearest neighbor method. Results show that the proposed method can effectively identify the preinstalled void disease of railway subgrade. The detection accuracy met the requirements of the roadbed disease identification of railways. The method used in this study was insensitive to the echo phase, and was suitable for detecting 0° and 180° phase target echoes. The proposed method provides a new means of identifying railway subgrade diseases and is significant in developing automatic technology for subsurface target detection based on GPR.

Keywords: Ground-penetrating radar, Directional feature, Curvelet transform, Nearest neighbor method, Railway subgrade diseases.

1. INTRODUCTION

Ground-penetrating radar (GPR) is widely used in detecting the subsurface target in civil infrastructure, archaeology, and military [1-4] for its rapid, continuous, and non-destructive properties. However, GPR dataset is large, and relying on the experience of technical staff in determining subsurface targets is inefficient. For example, the operating mileage of high-speed railway in China has exceeded 20,000 km by the end of 2016; in detecting diseases inside the high-speed railway, results identified more than 100 million traces using GPR. Identifying subsurface diseases manually is challenging. Moreover, having inexperienced technical staff, fatigue and other factors will cause low efficiency, and missed and false alarm, which is unconducive for repair and maintenance work. Therefore, automatic effective detection and identification technology are the development trend of GPR.

Feature extraction is the foundation of target identification. A wide variety of targets exist in subsurface, such as pipes in civil

infrastructure, layer information in archaeology, and void diseases in reinforced concrete (RC). The features of target echoes differ in amplitude, phase and directions, because various materials possess different properties. Moreover, the crosstalk between the transmitting and receiving antennas, multiple wave, strong reflection of rebar, and background medium anisotropy clutter interference cause the GPR echo signal to show different features in time-frequency domain, which heightens the difficulty of detection. Thus, efficient extraction of target echo feature should be the focus in identifying and classifying subsurface targets.

This study focuses on the directional feature of target echoes, and proposes a new algorithm based on curvelet transform (CT) to extract target echo features and identify the target in a GPR map.

2. STATE OF THE ART

GPR was first used by Hülsmeyer in 1904 for the detection of metal objects [5]. Various methods have been presented by scholars to extract target features. According to different principle of data processing, those methods can be divided into two categories: image-based and echo signal-based methods.

Image-based methods regard GPR map as an image and process target echoes using digital image processing algorithm. Long and Simi [6-7] extracted the hyperbolic feature using least squares and Hough transform (HT) to detect underground mines and pipes. Wang et al. [8] improved the HT and proposed a fast HT algorithm. Freeland [9] proposed a texture feature-based method in energy, contrast, entropy, and homogeneity, and constructed the neural network classifier to categorize interlayer radar echo targets. Nath and Bhuiyan [10] used grayscale morphology for gradient extraction, contrast enhancement, and region segmentation (watershed algorithm), as well as noise removal and smoothing, which were combined with an infrared sensor to detect buried anti-personnel mines. Currently, numerous image processing algorithms can be used to process GPR maps. However, when radar signal converts to image signal, weak echo signals, such as void disease echo underneath a rebar, are easy to overlook due to the finite length of the space in each pixel, which restricts its promotion.

Echo signal-based methods extract target echo features from A- or B-scan data. Xie et al. [11] simulated void diseases in RC structure through finite-difference time-domain (FDTD) [12-13] preprocessed by predictive deconvolution and identified diseases beneath a rebar using support vector machine. Reichma et al. [14] proposed a Wiener inverse filtering method to extract features and recognize a target through singular value decomposition. Cui et al. [15] used GPR to detect sandy loam in the west of China, and presented autoregressive moving average power spectrum to estimate moisture contents and compactness values. However, given the complexity and uniqueness of the railway subgrade structure, multilayer rebar exists in ballastless track; thus, these methods cannot be applied to detect subsurface diseases.

The recent development of multiscale geometric analysis (MGA) based on wavelet provides a new idea for the extraction of directional features. Tzani [16] proposed the CT to enhance echo signals and extract directional information. Zhang [17] used the ridgelet transform to suppress direct waves. In those cases, the MGA algorithm was always used for noise suppression but seldom used for identification and classification.

Thus, in this study, the directional features of a GPR echo signal are analyzed, and a new feature extraction method is proposed to construct a feature vector subspace and identify subsurface targets. The rest of this paper is arranged as follows. Section 3

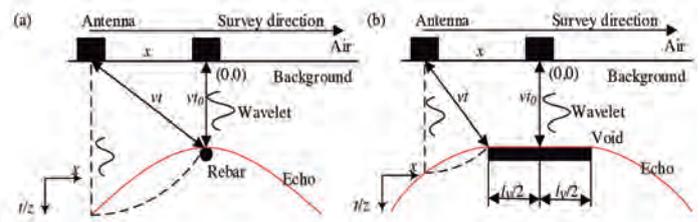


Fig. 1: GPR echo model (a) Rebar (b) Void

presents a target echo directional model, and a feature space based on CT domain and utilizes nearest neighbor (NN) [18-19] method to classify targets. Section 4 discusses the process result using forward simulation and field experiment, and analyzes factors that affect feature distribution. Section 5 presents the relevant conclusions.

3. METHODOLOGY

3.1. TARGET ECHO DIRECTIONAL MODEL

Point target (PT, e.g., rebar) and body target (BT, e.g., cuboid) are the typical forms in subsurface structure. This section focuses on PT and BT in constructing echo models and analyzes the directional features in a GPR map.

(1) PT echo model

The PT represented by rebar and pipes is important in detecting subsurface targets using GPR. Fig. 1(a) shows the PT echo model, with rebar as an example, x represents the horizontal axis; t or z represents the vertical axis, $t=z/v$; and v is the velocity of electromagnetic in the background medium. The black rectangles represent GPR antennas (transmitter/receiver antennas). The background medium parameters are ϵ_r , μ_r , and σ , where ϵ_r denotes the relative permittivity, μ_r denotes the relative permeability, and σ denotes conductivity.

Given that the background is a low-loss medium, the velocity is constant ($v = c/\sqrt{\epsilon_r}$, where c is the speed of light). The intersection point of the vertical line passing through the rebar and air-ground interface is the coordinate origin $(0, 0)$, and the survey direction x is the horizontal coordinate, and the vertical downward direction t/z is the vertical coordinate. When the antenna is at $(0, 0)$, the two-way travel time is t_0 ; when the antenna is at $(x, 0)$, the two-way travel time is t . In GPR, the measured data in a certain position are generally called A-scan, and the measured data along the survey direction are called B-scan. Given that function $f(x, t)$ in 2D space can be expressed as

$$f(x, t) = \frac{2}{v} \sqrt{x^2 + (vt_0/2)^2} - t \quad (1)$$

then the BT echo hyperbola can be written as a Dirac delta function, as shown as follows:

$$\delta\{f(x, t)\} = \begin{cases} 1 & f(x, t) = 0 \\ 0 & f(x, t) \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

According to Maxwell equation, the electromagnetic (EM) field decays exponentially with increasing distance when the EM wave propagates in free space.

$$E = E_0 e^{-\alpha z} e^{-i\beta z} \quad (3)$$

where E_0 denotes the amplitude when $z=0$, and the size of amplitude associates with GPR antenna power; α denotes the attenuation coefficient, $\alpha = \alpha_0 \sqrt{1 + (\frac{\sigma}{\omega \epsilon})^2}$; and β denotes the phase factor, $\beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \sqrt{1 + (\frac{\sigma}{\omega \epsilon})^2}$.

In low-loss medium, the parameters satisfy $\sigma \leq \omega \epsilon$ and $\beta \approx \omega \sqrt{\mu \epsilon}$; thus, the phase velocity is approximately equal in all frequencies and there are only differences in amplitude between different position of target echo signals. Given that the echo attenuation function is γ , when the target location is fixed, γ is a function of x ($\gamma = \gamma(x)$), and wavelet is $w(t)$, then the GPR echo $Q(x, t)$ can be expressed as a convolution between $\delta\{f(x, t)\}$ and attenuation wavelet $\gamma(x)w(t)$ considering time t is

$$Q(x, t) = \delta\{f(x, t)\} * [\gamma(x)w(t)]. \quad (4)$$

On the basis of the above analysis, the PT echo signals in GPR map show evident directional properties, which are close to the curve asymptote when x tends to be infinite.

(2) BT echo model

The BT represented by void diseases is also important in subsurface structure. Fig. 1(b) shows the banded void echo model. In this case, given that the length of void is l_v the intersection point of the vertical line passing through the middle point of the void and air-ground interface is the coordinate origin $(0, 0)$, and the rest of the settings is the same as the PT echo model.

Similar with Eq. (1), given that the function $g(x, t)$ in 2D space

$$g(x, t) = \begin{cases} \frac{2}{v} \sqrt{(x+l_v/2)^2 + (vt_0/2)^2} - t & x \leq -l_v/2 \\ t_0 - t & -l_v/2 < x < l_v/2 \\ \frac{2}{v} \sqrt{(x-l_v/2)^2 + (vt_0/2)^2} - t & x \geq l_v/2 \end{cases} \quad (5)$$

then the void BT echo equation can be written as a Dirac delta function, as shown as follows:

$$\delta\{g(x, t)\} = \begin{cases} 1 & g(x, t) = 0 \\ 0 & g(x, t) \neq 0 \end{cases} \quad (6)$$

Similar with Eq. (4), GPR echoes $P(x, t)$ can be expressed as a convolution between $\delta\{g(x, t)\}$ and attenuation wavelet $\gamma(x)w(t)$ considering time t .

$$P(x, t) = \delta\{g(x, t)\} * [\gamma(x)w(t)] \quad (7)$$

Fig. 1(b) and Eqs. (5) and (6) prove that the echoes on the left and the right edges are the same as the part of PT echo in Fig. 1(a), and that the middle part of the echoes are horizontal.

3.2. DIRECTION CLASSIFICATION OF SUBSURFACE TARGET

According to Section 3.1, direction is an important feature in GPR target echo. However, the subsurface structure is complicated. For example, several diseases exist in the railway subgrade, such as frost boiling and mud pumping, as well as ballast subsidence. And sometimes all the echoes of one disease may not be displayed in a processing window; thus, on the basis of echo directional feature, subsurface targets can be divided into five categories: nontarget (NT), PT, finite BT (FBT), infinite BT (IBT), and half-infinite BT (HIBT).

(1) NT: Without a target echo, B-scan data only contain noise signal. For example, GPR echo signals are only composed

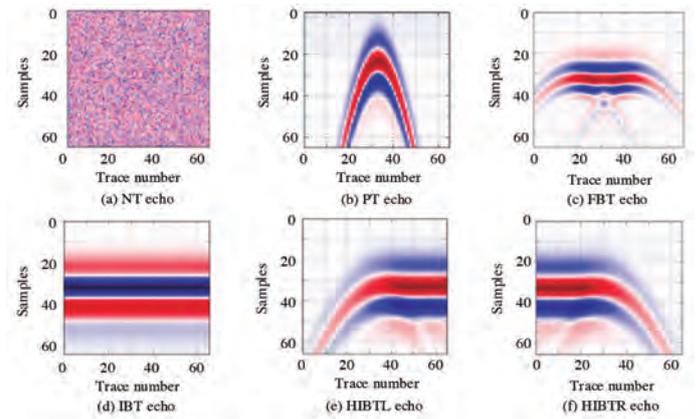


Fig. 2: Different target echoes in B-scan

of medium anisotropy echo, which is caused by the uneven mixing of concrete aggregates.

- (2) PT: When the target vertical cross-sectional area is very small, the distance between the antenna and every point on the target can be regarded as a fixed value. Then, the target is called PT. For example, the diameter of a rebar in a ballastless track is considerably small. The diameter of the upper pre-stressing tendon is $\Phi=10$ mm in CRTS-II slab ballastless track. A hyperbolic feature of the echo is relatively clear, and the horizontal part is limited. Here, the rebar can be called a PT.
- (3) FBT: When the horizontal part of the target echo is relatively long, but all the echoes can still be included in a processing window (Fig. 1(b)). These targets include void diseases of concrete-asphalt (CA) mortar in a ballastless track structure, frost boiling, and mud pumping diseases in a ballast track structure.
- (4) IBT: When the length of the target is sufficiently large, only the horizontal part of the echoes exists in a processing window, such as the interface echo of the subgrade top and bottom layers.
- (5) HIBT: When the length of the target is between FBT and IBT, the parts of the edge and horizontal echoes exist in a processing window. According to the different side echo signals detected by GPR, HIBT can be divided into HIBT left (HIBTL) and HIBT right (HIBTR). The left represents entrance direction, and the right represents departure direction.

As shown in Fig. 2, different types of target echo exist in different directions. Fig. 2(a) for NT echo is composed of a noise signal without a directional feature. Fig. 2(b) for PT echo shows a hyperbolic feature, which is consistent with the direction of the asymptote. Symmetry distribution exists in the position of a PT. Fig. 2(c) for FBT echo shows a part of the hyperbolic feature at the edge with the directions of the asymptote and the horizon in the middle part. The length of the horizontal part concerns with the length l_v of the target. When $l_v \rightarrow 0$, the type of the target changes from FBT to PT; when $l_v \rightarrow \infty$, the type of the target changes from FBT to IBT. Fig. 2(d) for IBT echo shows a horizontal direction, which is the same as the middle part of the FBT echo. Fig. 2(e) for HIBTL shows the left part of the hyperbolic feature with the direction of the asymptote and the horizontal part with the direction of the horizon. Fig. 2(f) for HIBTR shows the right part of the hyperbolic feature with the direction of the asymptote and the horizontal part with the direction of the horizon.

3.3. DISCRET CT (DCT)

CT is an MGA method proposed by Candès and Donoho et al. [20-23]. This method overcomes the limitation of the wavelet

transform in 2D image singular analysis. The development process of CT has experienced ridgelet transform [20], particularly the first and second generations of CT [21-23]. The current study focuses on the second-generation CT.

According to Radon transform (RT) [24-25] and projection slice theorem [26], the RT and 2D Fourier transform (2D-FT) can be written as

$$Rf(\theta, t) = \int_{R^2} f(x_1, x_2) \delta(x_1 \cos \theta + x_2 \sin \theta - t) dx_1 dx_2 \quad (8)$$

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} R_f(\theta, t) \exp(-j2\pi qp) dp \quad (9)$$

where $Rf(\theta, t)$ denotes the RT of $f(x_1, x_2)$, which indicates the line integral of the function $f(x_1, x_2)$ with direction θ and intercept t . $F(u, v)$ denotes 2D-FT. The relationship between RT and 2D-FT can prove that the 1D inverse FT (IFT) in direction θ is the RT. Thus, the projection in a certain direction in the 2D-FT space also reflects the feature of the corresponding direction in the 2D space-time domain. On this basis, the ridgelet transform and the first-generation CT are proposed according to the multiscale wavelet transform of the line integral in a certain direction.

In 2002, Candès and Donoho [21] proposed the second-generation CT based on radial window W_r and angular window V_r

$$c(j, l, k) = \langle f, \varphi_{j,l,k} \rangle = \int_{R^2} f(x_1, x_2) \varphi_{j,l,k}^*(x_1, x_2) dx \quad (10)$$

where $c(j, l, k)$ denotes the curvelet coefficient; j, l , and k denote scale, direction, and translation, respectively, $k=(x_1, x_2)$; $\varphi_{j,l,k}$ denotes the "mother" curvelet; and the superscript "*" denotes the conjugate.

In 2005, Candès and Donoho et al. [22] utilized the Cartesian coordinate to replace the polar coordinate, built the discrete CT (DCT), and proposed two digital implementations: unequally spaced fast Fourier transforms and swapping. DCT is shown as follow:

$$c^D(j, l, k) = \sum_{0 \leq x_1, x_2 < n} f(x_1, x_2) \varphi_{j,l,k}^{D*}(x_1, x_2) \quad (11)$$

where $c^D(j, l, k)$ denotes discrete curvelet coefficient, $\varphi_{j,l,k}^D$ is the discrete "mother" curvelet, and the superscript D denotes digital.

Fig. 3 (see section: supplementary material) presents the time-frequency feature of CT. In Fig. 3(a), a multiscale decomposition is shown in a Cartesian coordinate in frequency domain. In this figure, the data matrix size is (256, 256), and according to CT, the data can be divided into five layers: coarse layer, Scales 2-4, and the finest layer. The coarse and the finest layers represent low and high frequencies, respectively, and Scales 2-4 represent detail layers in middle-high frequencies. The directional resolutions of the coarse and finest layers are both one, those of Scales 2-4 are 16, 32, and 32, respectively. The colored part in Fig. 3(a) denotes the middle- and high-frequency bandpass filters, where $\theta = \pi/4$ ($l=8$) in Scale 3. Fig. 3(b) presents a detailed 3D graphics of the colored part of Fig. 3(a). Fig. 3(c) shows the directional resolutions of the coarse layer, and Scales 2 and 3.

3.4. FEATURE EXTRACTION OF GPR TARGET ECHO

In Sections 3.1 and 3.3, the directional feature of GPR target echo and the sensitive direction of CT have been studied. According to Eq. (13), $c^D(j, l, k)$ represents coefficient in scale j , direction l , and translation k , and mother curvelet $\varphi_{j,l,k}^D(x_1, x_2)$ is orthogonal. Thus, based on frame theory and Parseval theorem, the 2D GPR

map of the B-scan $f(x_1, x_2)$ can be written as follows:

$$f(x_1, x_2) = \left\langle c^D(j, l, k), \varphi_{j,l,k}^D(x_1, x_2) \right\rangle \quad (12)$$

Therefore, the sum of $c^D(j, l, k)$ in different translation positions $K(k_1, k_2)$ denotes energy statistical feature in scale j and direction l .

$$s_{j,l} = \sum_{k_1} \sum_{k_2} |c^D(j, l, k)| \quad (13)$$

where $s_{j,l}$ represents the energy statistical feature in j and l .

The five types of target echo are processed by CT, and the energy statistical feature is shown as follows.

(1) NT echo feature

In NT echo, the GPR map is only composed of medium anisotropy echo, which is caused by the uneven mixing of concrete aggregates. Generally, the medium parameters of uneven mixing follow the Gaussian distribution [27]. The 2-dB white Gaussian noise is used to replace the NT echo with echo data matrix size (200, 200). Then, the CT turns the matrix into five layers in the frequency domain, namely, coarse layer, Scale 2-4, and the finest layer. In the coarse and finest layers, the directional resolutions are both one, which implies that the IFT result represents all the directions within $[-\pi, \pi]$; thus these parts are ignored in this study. Fig. 4 (see section: supplementary material) shows the curvelet coefficient summary in different scales and directions, and the statistical distributions of energy in different scales and directions still follow random distribution. The directional resolutions of Scales 2-4 are 16, 32, and 32, respectively. Interpolation is performed on Scale 2 to compare the energy distribution of different scales and directions in one figure.

(2) PT echo feature

In PT echo, given that background medium parameters are $(\epsilon_r, \mu_r, \sigma) = (6, 1, 0.1)$, and rebar is PT. FDTD and finite element methods [28] are often used for data simulation. In this study, software gprMax [29-30] based on FDTD is used for forward simulation with echo data matrix size (200, 200). Then, the echo data are processed by CT, and the statistical feature of the energy is obtained in different scales and directions. Fig. 5(a) shows the simulation result, where the long axis of the ellipse represents the direction. Energy is mainly concentrated in the direction of the hyperbolic asymptote.

Fig. 5(b) shows the statistical feature of the energy on Scales 2-4, where the energy is mainly concentrated in directions $l = \{11, 12, 13, 14, 27, 28, 29, 30\}$. The angle θ corresponding to the directions is $\theta \in [-5\pi/8, -3\pi/8] \cup [3\pi/8, 5\pi/8]$.

(3) IBT echo feature

The feature of IBT echo is similar with that of PT echo, except that a different medium layer is regarded as IBT.

Fig. 5(c) shows the simulation result with echo data matrix size (200, 200). Fig. 5(d) shows the statistical feature of the energy in Scales 2-4, where the energy is mainly concentrated in directions $l = \{4, 5, 20, 21\}$. The angle θ corresponding to the directions is $\theta \in [-\pi/8, \pi/8] \cup [7\pi/8, 9\pi/8]$.

(4) Other types of target echo feature

According to the above analysis, PT and IBT echoes possess directional features in the statistical distribution of energy based on CT; the distribution maintains consistency with different scales. However, in Fig. 5(b), more information is represented on Scale 3, with the energy attenuation in directions $l = \{12, 13, 28, 29\}$. Thus,

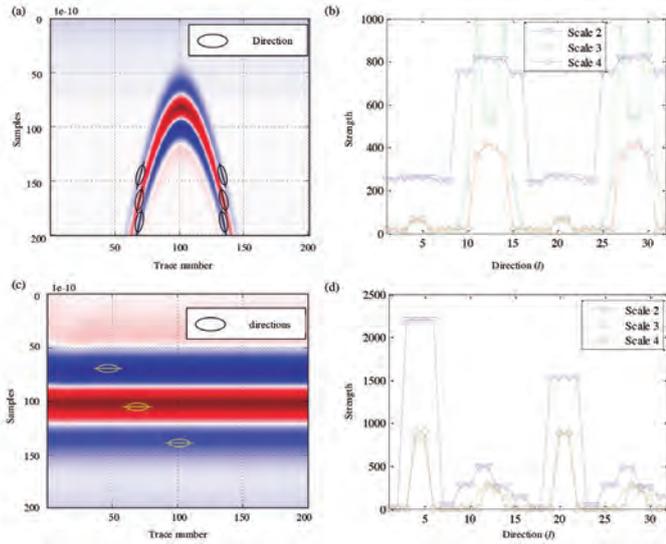


Fig. 5: Echoes and statistical features of energy: (a) PT echo simulation result; (b) Statistical feature of the CT energy of PT echo; (c) Simulation result of IBT echo; (d) Statistical feature of the energy of IBT echo

for FBT and HIBT, only the statistical feature of energy on Scale 3 is considered. As shown in Fig. 6, normalization is performed to analyze the direction in the same proportion.

$$S'_{jl} = \frac{S_{jl}}{\sum_l S_{jl}} \quad (14)$$

The FBT echo energy is mainly concentrated in directions $l = \{4, 5, 20, 11, 12, 13, 14, 27, 28, 29, 30\}$. The angle θ corresponding to the directions is $\theta \in [-\frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{8}] \cup [7\frac{\pi}{8}, 9\frac{\pi}{8}] \cup [-5\frac{\pi}{8}, -3\frac{\pi}{8}] \cup [3\frac{\pi}{8}, 5\frac{\pi}{8}]$. Similar with the Scale 3 on Fig. 5(b), the energy attenuates in directions $l = \{12, 13, 28, 29\}$, where directions $l = \{4, 5, 20, 21\}$ and $l = \{11, 12, 13, 14, 27, 28, 29, 30\}$ represent the energy of the horizontal and edge parts, respectively.

The energies of the HIBTL and HIBTR echoes are mainly concentrated in directions $l = \{11, 12, 13, 14, 27, 28, 29, 30\}$. The distribution is essentially consistent with the PT echo but is not symmetric in $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$. By contrast, the energy distributions of HIBL and HIBR are symmetric in $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$.

The energy contribution of different targets in circumferential phase $[-\pi, \pi]$ is shown in Fig. 7 (see section: supplementary material).

3.5. TARGET CLASSIFICATION

The statistical features of the energy of different targets gained by the CT on Scale 3 form a 32-dimension vector subspace, and the feature in each target is a point in the subspace

$$S_i = (S'_{i,1}, S'_{i,2}, \dots, S'_{i,j}, \dots, S'_{i,32})^T \quad (15)$$

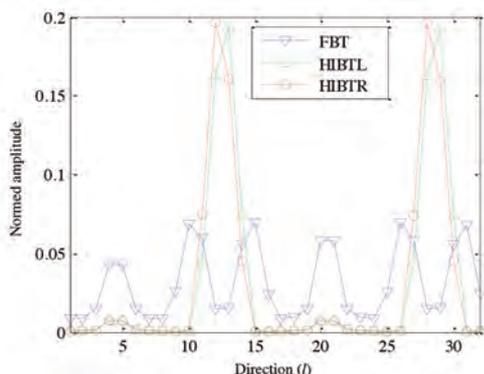


Fig. 6: Comparison between different targets on Scale 3

where superscript T represents vector transpose, $j=3, l=1, 2, \dots, 32, i=1, 2, \dots, 6$, and i represents NT, PT, IBT, FBT, HIBTL, and HIBTR, respectively. Matrix $S = \{S_1, S_2, \dots, S_6\}$ consists of feature subspace. For NT, directional feature does not exist on all scales; thus, $S_i = (0, 0, \dots, 0)$, which is the origin point in the 32-dimension subspace.

A partition of the six-feature vector in a subspace based on NN is shown in Fig. 8 (see section: supplementary material).

Given that the unknown GPR echo sample is C , the feature vector of C on Scale 3 is S_x . Then, the distance between S_x and S_i can be expressed as follows:

$$d_i = \|S_i - S_x\| \quad (16)$$

According to NN, sample C belongs to classification i , where

$$i := \arg \min_i d_i \quad (17)$$

The algorithm flow based on directional feature extraction and recognition is shown as follows:

- (1) The relative permittivity of background medium ϵ_r is determined;
- (2) According to ϵ_r models based on the six types of target are constructed, and forward simulations are executed;
- (3) Feature vectors S_i on Scale 3 are formed using CT, and subspace $\{S_i\}, i=1 \dots 6$ is built;
- (4) GPR echo sample C is obtained on the basis of detection;
- (5) Preprocessing is performed to depress the direct wave etc., and echo C changes to C_i ;
- (6) CT is processed on C_i , and feature vector S_x is achieved;
- (7) NN algorithm is executed to realize the classification according to Eqs. (16) and (17).

4. RESULT ANALYSIS AND DISCUSSION

4.1. EXPERIMENT

To verify the proposed algorithm, void diseases in RC structure were concerned in this study, and a field experiment was conducted at the No. 2 Project of the Engineer Training Center in Shijiazhuang Tiedao University. The preinstalled void disease is composed of polystyrene foam with 20 cm length, an RIS-K2 system constructed by IDS (Ingegneria dei Sistemi SpA, Italy) is used with 900 MHz antenna. The disease arrangement, detection, and processing result are shown in Fig. 9 (see section: supplementary material).

Fig. 9 (d) reveals the statistical feature of the energy on Scale 3; the NN classification method is processed. Result is shown in Fig. 10 that the shortest distance exists between the feature vector of sample echo and that of the simulated FBT echo with $d=0.067$, which is consistent with the preinstalled diseases.

4.2. INFLUENCE OF RELATIVE PERMITTIVITY ON THE FEATURE

For PT, FBT, and HIBT, the direction of the asymptote is important in distinguishing them from the IBT. The wave velocity v is directly affected by the relative permittivity of the background medium; the directional feature of the target echo is related to wave velocity v .

According to Eqs. (1) and (2), the asymptote of a hyperbola can be written as follows:

$$\frac{dt}{dx} = \pm 2\sqrt{\epsilon_r} / c \quad (18)$$

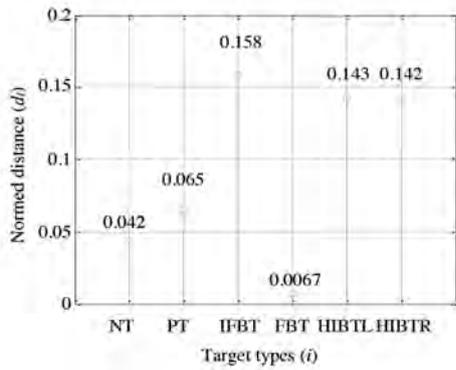


Fig. 10: Distances between the sample echo and the simulated echoes

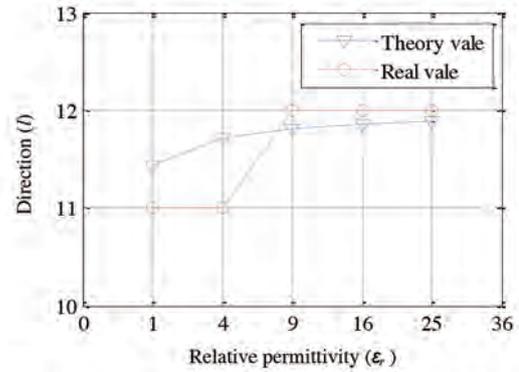


Fig. 11: Energy distribution between different permittivities

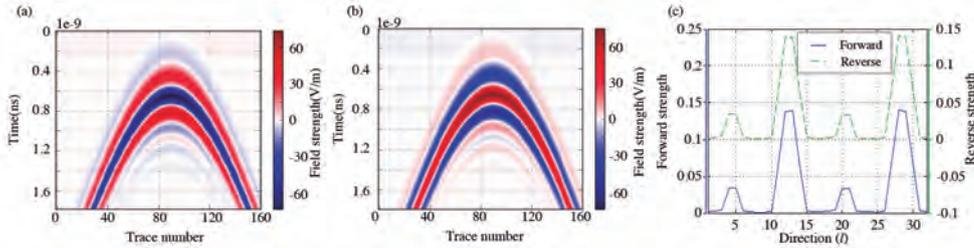


Fig. 12: Features comparison between the forward and reverse simulations on Scale 3: (a) Forward direction simulation; (b) Reverse direction simulation; (c) Processing results on Scale 3

The discretization of time and survey direction is needed in mesh division. Given that trace interval between A-scans is Δx , and the time interval between the samples in an A-scan is Δt , the discretized asymptote can be expressed as follows:

$$\frac{dm}{dn} = \pm \frac{2\sqrt{\epsilon_r} \Delta x}{c \Delta t} \quad (19)$$

where n and m denote the horizontal and vertical grids, respectively; $x = n\Delta x$; and $t = m\Delta t$.

For example, given that sample window $t = 6$ ns, sample points are 1000 points, $\Delta t = 6 \times 10^{-12}$ ns, and trace interval $\Delta x = 2$ mm. On Scale 3, directional resolution is $2\pi/32$, and an interval $[-\pi/2, 0]$ is divided into 8 parts equally, representing directions l from 5 to 12, respectively. Generally, the relative permittivity ϵ_r of the background medium lies in interval $[1, 25]$. Thus, given that $\epsilon_r = \{1, 4, 9, 16, 25\}$ forward simulations are processed. The energy distribution is shown in Fig. 11. The blue and red lines represent the theory distribution and simulated results, respectively. When relative permittivity ϵ_r changes, the energy feature of the hyperbola asymptote is mainly distributed in the interval $[-7\pi/16, -\pi/2]$ ($l = \{11, 12\}$). However, distribution changes occur on $\epsilon_r \in [4, 9]$. Therefore, velocity estimation or relative permittivity detection should be implemented before the construction of the feature subspace.

4.3. INFLUENCE OF TARGET ECHO PHASE ON THE FEATURE

Different echo phases may occur in various surfaces. According to the law of reflection regarding EM wave, reflection coefficient r_i can be expressed as

$$r_i = \frac{\eta_{i+1} - \eta_i}{\eta_{i+1} + \eta_i} \quad (20)$$

where η_i denotes the wave impedance of the i th layer medium. When $\eta_{i+1} - \eta_i > 0$, r_i is positive, and the echo phase of the reflec-

tion wave is the same to that of the incident wave (0° phase). By contrast, when $\eta_{i+1} - \eta_i < 0$, r_i is negative, and the echo phase of the reflection wave is opposite to that of the incident wave (180° phase). For example, given that the background medium of PT is $\epsilon_r = 1$, the target medium is $\epsilon_r = 9$, and forward simulations are processed. The forward and reverse results are shown in Figs. 12(a) and 12(b). Fig.

12(c) shows the processing result of the statistical features of the energy. The two curves reveal that the energy feature is exactly the same in every direction. Thus, the proposed algorithm is insensitive to echo phase, and is applicable to 0° and 180° phases.

4.4 INFLUENCE OF VOID SIZE ON CLASSIFICATION

The length l_v of void plays an important role in classification based on direction. When the length l_v approaches zero, the void target is regarded as a PT; when the length l_v approaches infinity, the void target is regarded as an IBT; and when the length l_v is between zero and infinite, the void target is regarded as an FBT or HIBT. Thus, void size affects classification. Simulations are conducted to analyze the accuracy of classification.

Given that background medium parameters are $(\epsilon_r, \mu_r, \sigma) = (6, 1, 0.1)$, the grid size is $2 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$. Moreover, given that void length for PT is 1 cm and that for FBT is 20 cm, then simulations are performed when the length l_v is equal to $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 15, 20\}$. Classification results are shown in Table 1, when the void length is less than or equal to 4 cm, the voids are classified as PT, and others are classified as FBT.

In detecting railway roadbed diseases with ballastless track, when the length of void disease is less than 8 cm in CA mortar, the stress of the track structure is not more than its strength, and the track structure is considered safe. Thus, the proposed algorithm satisfies the requirements of identifying railway roadbed diseases.

5. CONCLUSION

To overcome the difficulty of target recognition caused by the complexity of target echo, a feature extraction and target identification method based on the directional feature of a target echo were proposed in this study. The principal directional features of target echoes were initially analyzed. Then, feature extraction of shallow subsurface targets and identification method were performed based on the directional selectivity of CT. The following conclusions are drawn:

- (1) The direction of the target echo is an important feature of GPR. For PT echo, the direction of the hyperbolic asymptote

Void length l_v (cm)	NT	PT	FBT	IBT	HBTL	HBTR	Result
1	0.231	0	0.023	0.537	0.131	0.145	PT
2	0.239	0.013	0.029	0.546	0.134	0.149	PT
3	0.243	0.023	0.035	0.550	0.141	0.157	PT
4	0.237	0.024	0.027	0.546	0.150	0.164	PT
5	0.231	0.025	0.020	0.539	0.152	0.167	FBT
6	0.221	0.040	0.023	0.531	0.163	0.178	FBT
7	0.204	0.070	0.050	0.517	0.177	0.190	FBT
8	0.215	0.045	0.027	0.522	0.149	0.161	FBT
15	0.228	0.019	0.011	0.536	0.142	0.156	FBT
20	0.224	0.023	0	0.535	0.146	0.159	FBT

Table 1: Influence of void size on identification

is the principal directional feature. For IBT echo, the direction of the horizon is the principal directional feature. For FBT and HBTL, the directional features are the linear combination of PT and IBT.

(2) The statistical feature of the energy on the Scale 3 of CT represents the energy distribution of different targets in various directions. Calculation results show that the energy in the horizon distributes in directions $l=\{4,5,20,21\}$. The energy in the asymptote is related to relative permittivity and is symmetric with directions $l=\{12,13\}/\{28,29\}$.

(3) The 32-dimension feature subspace based on the statistical feature of energy and the NN method are effective and efficient in classifying subsurface targets. The forward simulation and field experiment show that the proposed method is insensitive to the echo phase and satisfies the requirements of identifying railway subgrade diseases.

The classification method used in this study overcomes the problems of low efficiency and high missed/false alarm rate by manual. It is significant to generalize GPR to detect the diseases in railway subgrade, which has the properties of long distance and large data. However, the objects in this study are point and banded sharps along the survey line. The applicability of the proposed method to singular sharps, for example ball and funnel, needs further discussion. Meanwhile, the large amount of disease detection data in railway roadbed leads to the requirement of the sparse representation, such as the types, shapes, and locations of diseases. Thus, this study is only a part of disease sparse representation, and the rest of the research should be further explored.

BIBLIOGRAPHY

[1] Grandjean G, Gourry J C, Bitri A. "Evaluation of GPR techniques for civil-engineering applications: study on a test site". *Journal of Applied Geophysics*. October 2000. Vol. 45-3. p.141-156. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0926-9851\(00\)00021-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0926-9851(00)00021-5)

[2] Malagodi S, Orlando L, Piro S, et al. "Location of Archaeological Structures using GPR Method: Three-dimensional Data Acquisition and Radar Signal Processing". *Archaeological Prospection*. March 1996. Vol. 3-1. p.13-23. DOI: [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0763\(199603\)3:1<13::AID-ARP37>3.0.CO;2-4](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-0763(199603)3:1<13::AID-ARP37>3.0.CO;2-4)

[3] Kositsky J, Amazeen C A. "Results from a forward-looking GPR mine detection system". *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. March,2001. p.700-711. DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.445523>

[4] Khakiev Z, Shapovalov V, Kruglikov A, et al. "GPR determination of physical parameters of railway structural layers". *Journal of Applied Geophysics*. July,2014. Vol. 106-7. p.139-145. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.04.017>

[5] Gaspere G. *100 Years of Radar*. Springer International Publishing, 2016. 399 p. ISBN: 978-3-319-00584-3

[6] Long K, Davidson N. "Image processing of ground penetrating radar data for landmine detection". *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. May 2006. Vol. 6217. p.1-12. DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.664038>

[7] Simi A, Bracciali S, Manacorda G. "Hough transform based automatic pipe detection for array GPR: Algorithm development and on-site tests". *Radar Conference*. May, 2008. p.1-6. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/RADAR.2008.4720763>

[8] Wang J, Su Y. "Fast Detection of GPR Objects with Cross Correlation and Hough Transform". *Progress in Electromagnetics Research C*. August, 2013. Vol. 38. p.229-239. DOI: <http://dx.doi.org/10.2528/PIERC13022510>

[9] Freeland R S. "Subsurface Characterization using Textural Features Extracted from

GPR Data". *Transactions of the Asabe*. January 2007. Vol. 50-1. p.287-293.DOI: <http://dx.doi.org/10.13031/2013.22392>

[10] Nath B, Bhuiyan A. "A Geometrical Feature Based Sensor Fusion Model of GPR and IR for the Detection and Classification of Anti-Personnel Mines" *International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*. IEEE. November 2007. p.849-856. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISDA.2007.21>

[11] Xie X, Qin H, Yu C, et al. "An automatic recognition algorithm for GPR images of RC structure voids". *Journal of Applied Geophysics*. Decemember 2013. Vol. 99-12. p.125-134. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.02.016>

[12] Ando Y. "Implementation of the Perfect Matched Layer to the CIP Method". *leice Transactions on Electronics*. May 2006. Vol. 89-5. p.645-648. DOI: <http://dx.doi.org/10.1093/ietele/e89-c.5.645>

[13] Solla M, Asorey-Cacheda R, Núñez-Nieto X, et al. "Evaluation of historical bridges through recreation of GPR models with the FDTD algorithm". *Ndt & E International*. January 2016. Vol. 77. p.19-27.DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndtint.2015.09.003>

[14] Reichman D, Morton K D, Collins L M, et al. "Target localization and signature extraction in GPR data using expectation-maximization and principal component analysis". *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. May, 2014. Vol. 9072-3. p.1-19. doi: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2049874>

[15] Cui F, Wu Z Y, Wang L, et al. "Application of the Ground Penetrating Radar ARMA power spectrum estimation method to detect moisture content and compactness values in sandy loam". *Journal of Applied Geophysics*. September 2015. Vol. 120. p.26-35. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.06.006>

[16] Tzaniis A. "The Curvelet Transform in the analysis of 2-D GPR data: Signal enhancement and extraction of orientation-and-scale-dependent information". *Journal of Applied Geophysics*. February, 2015. Vol. 115-2C. p.145-170. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.02.015>

[17] Zhang Z Y, Zhang J L, Yu H Y, et al. "Ridgelet transform with application in ground penetrating radar processing". *International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition*. IEEE Xplore. January 2007. p. 1054-1059.DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICWAPR.2007.4421588>

[18] Dhurandhar A, Dobra A. "Probabilistic characterization of nearest neighbor classifier". *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*. April 2013. Vol. 4-4. p.259-272. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s13042-012-0091-y>

[19] Belongie S, Malik J, Puzicha J. "Shape matching and object recognition using shape contexts". *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*. August 2010. Vol. 24-4. p.509-522. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/34.993558>

[20] Candès E J. "Ridgelets and the Representation of Multilid Sobolev Functions". *Siam Journal on Mathematical Analysis*. March 2000. Vol. 33-2. p.347-368. DOI: <http://dx.doi.org/10.1137/S003614109936364X>

[21] Candès E J, Donoho D L. "New tight frames of curvelets and optimal representations of objects with piecewise C2 singularities". *Communications on Pure and Applied Mathematics*. November 2004. Vol. 57-2. p.219-266. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/cpa.10116>

[22] Candès E J, Demanet L. "The curvelet representation of wave propagators is optimally sparse". *Communications on Pure and Applied Mathematics*. March 2005. Vol. 58-11. p.1472-1528. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/cpa.20078>

[23] Candès E J, Demanet L, Donoho D L, et al. "Fast Discrete Curvelet Transforms". *Multiscale Modeling & Simulation*. September 2006. Vol. 5-3. p.861-899. DOI: <http://dx.doi.org/10.1137/05064182X>

[24] Karabchevsky A, Karabchevsky S, Abdulhalim I. "Fast surface plasmon resonance imaging sensor using Radon transform". *Sensors & Actuators B Chemical*. July 2011. Vol. 155-1. p.361-365. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2010.12.012>

[25] Matus F, Flusser J. "Image representation via a finite Radon transform". *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*. August 1993. Vol. 15-10. p.996-1006.DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/34.254058>

[26] Ng R. "Fourier slice photograph". *Acm Transactions on Graphics*. July 2005. Vol. 24-3. p.735-744.DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/1186822.1073256>

[27] Jiang Z, Zeng Z, Li J, et al. "Simulation and analysis of GPR signal based on stochastic media model with an ellipsoidal autocorrelation function". *Journal of Applied Geophysics*. March 2013, Vol. 99-3. p.91-97. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.08.005>

[28] Wang Y, Lu Y J, Si C D. "Tire-Pavement Coupling Dynamic Simulation under Tire High-Speed-Rolling Condition". *International Journal of Simulation Modelling*. June, 2016. Vol. 15-2. p.236-248. DOI: [http://dx.doi.org/10.2507/IJSIMM15\(2\)4.332](http://dx.doi.org/10.2507/IJSIMM15(2)4.332)

[29] Warren C, Giannopoulos A, Giannakis I. "An advanced GPR modelling framework: The next generation of gprMax". *International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar*. October 2015. p.1-4.DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IWAGPR.2015.7292621>

[30] Giannakis I, Giannopoulos A, Warren, C. "A Realistic FDTD Numerical Modeling Framework of Ground Penetrating Radar for Landmine Detection". *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. August 2016. Vol. 9-1, p.37-51. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2468597>

APPRECIATION

This study was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51578349) and the Railway Ministry of Science and Technology Research and Development Program of China (No. 2013G004-A-1).

SUPPLEMENTARY MATERIAL

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/8326-1.pdf



Propuesta metodológica para la evaluación del impacto esperado de fallos en equipos complejos. Caso aplicado a una planta de trituración de mineral de cobre



Methodological proposal for the evaluation of reliability impacts in complex systems. Applied case to a crushing copper plant



Fredy Kristjanpoller^{1,2}, Adolfo Crespo¹, Mónica López-Campos², Pablo Viveros^{1,2}

¹ Universidad de Sevilla. Escuela Superior de Ingeniería. Dpto de Organización y Gestión de Empresas I. Avda. Camino de los Descubrimientos, s/n - 41092 Sevilla (España). Tfno: +34 954 487215.

² Universidad Técnica Federico Santa María. Departamento de Industrias. Valparaíso (Chile). Tfno: +56 322654905.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8088> | Recibido: 20/06/2016 • Aceptado: 05/09/2016

ABSTRACT

- Analysis of the reliability and maintainability of a production process is relevant to the determination of availability and the capacity of the plant. In order to quantify the importance of each equipment in the systemic availability and improve decision-making related to asset management, it is proposed a new analysis tool: the methodology of the Expected Impact of Fault (IEF). It has as main novelty quantifying indicators of the real influence of each element in the total reliability/availability of the productive system. This is applicable in any logical functional configuration. In this way the importance of the equipment is set and is quantified more accurately the impact of his possible unavailability. The methodology starts with the management of the process data to analyze, and then proceeds to develop an analysis based on the classical technique of block diagram of reliability (RBD), which structure the teams according to their functional configuration by levels, in ascending order, to determine the availability of each item and of the system in general. Subsequently, IEF methodology makes descendant analysis, from the availability of the system to the impact of each element in particular in the expected availability of the system. This impact is expressed through indicators of Propagation of the Time of Failure (FPD) and the index of Expected Impact of Operational Criticality (ICO) of an element on the whole of the system. The use of these indicators has shown important results to evaluate the design and performance of a plant. In this case the methodology is applied to the actual data of a plant's crushing of a mining process.
- **Keywords:** reliability, availability, operational efficiency, criticality, physical assets.

RESUMEN

El análisis de la fiabilidad operacional y de la mantenibilidad de un proceso productivo es relevante para la determinación de la disponibilidad y de la capacidad de la planta. Con el fin de cuantificar la importancia de cada equipo en la disponibilidad sistémica y mejorar la toma de decisiones relacionadas con la gestión de activos, se propone una nueva herramienta de análisis: la metodología del Impacto Esperado de Fallos (IEF). Esta tiene como principal novedad el cuantificar mediante indicadores la influencia real de cada elemento en la fiabilidad/disponibilidad total del sistema productivo, siendo aplicable en cualquier configuración lógico funcional. De esta forma se establece la importancia de los equipos y se cuantifica con mayor precisión el impacto de su posible indisponibilidad. La

metodología inicia con la gestión de los datos del proceso a analizar, posteriormente se procede a desarrollar un análisis basado en la técnica clásica de diagrama de bloques de fiabilidad (RBD), la cual estructura los equipos de acuerdo a su configuración funcional por niveles, para llegar a determinar la disponibilidad de cada elemento y del sistema en general. Posteriormente, la metodología IEF hace el análisis descendiente, a partir de la disponibilidad del sistema hasta el impacto de cada elemento en particular en la disponibilidad esperada del sistema. Este impacto se expresa a través de los indicadores de Propagación del Tiempo de Detención (FPD) y del índice de Impacto Esperado de Criticidad Operacional (ICO) de un elemento sobre el conjunto del sistema. El uso de estos indicadores ha demostrado resultados importantes para evaluar el diseño y el rendimiento de una planta. En este caso la metodología es aplicada a los datos reales de una planta de triturado de un proceso minero.

Palabras clave: fiabilidad, disponibilidad, eficiencia operacional, criticidad, activos físicos.

1. INTRODUCCIÓN

La aplicación de técnicas de fiabilidad con el fin de apoyar la toma de decisiones, es una tarea fundamental para la gestión eficiente y precisa de los activos y recursos en cualquier organización industrial. Es conocido que la capacidad productiva real de una planta, depende fuertemente de la disponibilidad sistémica, la cual a su vez está determinada por la configuración lógica en la que se encuentran los equipos. Equipos dispuestos en serie o con alguna clase de redundancia tendrán de por sí, distinto impacto en la disponibilidad del sistema, independientemente de su propia fiabilidad y disponibilidad individual. Es decir, el tiempo de indisponibilidad del sistema no tiene por qué corresponder con el tiempo de indisponibilidad de los equipos en fallo, pues cada equipo tiene un distinto "factor de propagación" de su tiempo de detención en el tiempo de detención del sistema. Sin embargo, a pesar de la utilidad y relevancia de conocer esta información, durante la ejecución de la mayoría de los planes de gestión de activos, el análisis del mencionado "factor de propagación" y del impacto de cada equipo en la disponibilidad sistémica no es común. Esta carencia no es menor, ya que el conocer el impacto real de cada activo en la configuración del sistema total proporciona ventajas en la planificación de la producción y mantenimiento.

En general, se reconoce que la teoría de la fiabilidad, junto con el análisis de ciclo de vida de los activos, es un apoyo importante

para el análisis y mejora en plantas industriales [1]. La evaluación de la fiabilidad y disponibilidad, involucrando parámetros técnicos y de costos, es crucial en la evaluación del desempeño de un proceso industrial, específicamente en procesos productivos intensivos en capital [2]. Por otro lado, es conocido que el análisis de los KPI (*Key Performance Indicators*), es una forma efectiva para medir cuantitativamente los resultados y el desempeño de un proceso [3]. De aquí, se infiere que el contar con KPI que arrojen información relacionada con la cuantificación de la disponibilidad y del peso relativo de cada equipo en el sistema, por lo que es indispensable estudiar la criticidad de los activos para poder priorizar y focalizar las actividades de control del riesgo operacional [4].

A pesar de las ventajas de conocer el impacto esperado de fallo de cada elemento en la disponibilidad del sistema, se ha encontrado un vacío en este sentido. En la práctica industrial, frecuentemente se recurre a enfoques semi-cuantitativos como matrices de criticidad basadas en factores ponderados y flujogramas de análisis de riesgo, o bien se utilizan herramientas más bien genéricas desde el punto de vista de la toma de decisiones, como es el caso del *Proceso de Análisis Jerárquico* (AHP), las cuales necesariamente deben ser contextualizadas y adaptadas a cada caso, por consecuencia no necesariamente proporcionan resultados homogéneos y comparables entre procesos o instalaciones físicas. En la literatura científica exclusiva para la gestión de activos, solo se ha encontrado el *Índice de Birnbaum* [5] que permite la evaluación del impacto de equipos bajo una visión de riesgo epistémico, permitiendo un análisis directo, pero focalizado en procesos específicos. Este método compara los elementos entre sí, en función de la incertidumbre de fiabilidad que poseen y de la propagación de esta incertidumbre, con el objetivo de ordenarlos por nivel. Sin embargo dicho índice depende altamente de la calidad de los datos históricos, no considera directamente el efecto de la configuración lógica del sistema y es difícil de aplicar en sistemas compuestos por una cantidad considerable de elementos. Por otra parte Wang et al.[6] se basan en el índice Birnbaum y proponen una técnica de evaluación complementaria desde un enfoque probabilístico dependiente de una simulación.

El objetivo de este artículo es proponer una nueva metodología genérica, es decir aplicable sobre cualquier configuración lógico-funcional, cuantitativa e integral para el análisis de la disponi-

bilidad, y del impacto esperado de fallos (IEF) [7]. Esta propuesta diseña un nuevo algoritmo para calcular dos índices de impacto, el Índice de Criticidad Operacional esperado (ICO) y el Factor de Propagación del tiempo de Detención esperado (FPD), basados en la fiabilidad y capacidad de mantenimiento de los elementos; y el impacto esperado de cada uno de acuerdo a diferentes escenarios y configuraciones. Estos índices de impacto, basados en un enfoque probabilístico, definirán las condiciones previstas en el sistema, desde el punto de vista de la evaluación de sus posibles estados (comportamiento intrínseco), y en relación con la configuración lógica y funcional en el sistema. Permitiendo la comparación global de los elementos, su priorización y evaluación parcial de su efectividad.

2. DECLARACIÓN DEL PROBLEMA

El análisis de la bibliografía y la experiencia práctica han puesto a la luz la inexistencia de una metodología de utilización sencilla y aplicable a cualquier configuración lógica funcional, que cuantifique el impacto de un fallo en la disponibilidad general de un sistema complejo. En la mayoría de las empresas industriales, no existe un criterio formal para identificar el impacto de cada activo y de su comportamiento de fallo considerando su fiabilidad y la de su subsistema, por lo que las decisiones de reemplazo de los equipos se realizan ad hoc y no de acuerdo a los procesos de negocio. Lo que hace necesario definir una propuesta metodológica que incluya el uso de indicadores clave de rendimiento (KPI) orientados al análisis del impacto de cada elemento en la disponibilidad sistémica, haciendo posible una jerarquización útil para la toma de decisiones estratégicas y operativas.

La propuesta desarrollada, consiste en una metodología para la cuantificación del impacto esperado del fallo de cada elemento sobre la disponibilidad de un sistema complejo, a la cual se le ha denominado Metodología de Impacto Esperado de Fallos (IEF). La estructura de esta metodología, la hace aplicable en sistemas complejos con una gran cantidad de elementos, tomando especialmente en cuenta la configuración lógico-funcional de cada uno como parte del cálculo de los índices de impacto. La metodología IEF parte con la gestión de los datos provenientes del proceso industrial y posteriormente determina dos indicadores clave

Notación	
IEF:	Metodología de Impacto Esperado de Fallos
RBD:	Reliability Blocks Diagram – Diagrama de Bloques de Fiabilidad
FPD:	Factor de Propagación del Tiempo de Detención
ICO:	Impacto Esperado de Criticidad Operacional
KPI:	Key Process Indicator – Indicador Clave del Proceso
MTTF:	Mean time to failure – Tiempo medio para fallar
MTTR:	Mean time to repair – Tiempo medio para reparar
MTBM:	Mean time between maintenance – Tiempo medio entre mantenciones
A:	Disponibilidad
RAM:	Reliability, availability, maintainability methodology – Metodología de evaluación de fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad
α	Parámetro de escala de Distribución Weibull
β	Parámetro de forma de Distribución Weibull
CMMS	Computerized Maintenance Management System – Sistema informático de gestión de mantenimiento

Tabla 1: Notación

de proceso (KPI) relevantes en el análisis de la disponibilidad. El primero es el índice ICO y el segundo es el factor FPD. El cálculo y seguimiento de estos indicadores y de la metodología propuesta, pretende desenvolverse en estrecha relación con el control de la gestión a través la definición de estrategias y toma de decisiones [8, 9].

La metodología propuesta IEF, tiene como reto principal, dotar de información relevante para la mejora en la gestión de activos. Uno de los puntos más importantes es conocer el efecto operacional, medido sobre la pérdida de la capacidad de producción, de cada elemento sobre el sistema que lo contiene. El impacto de un elemento debe ser definido como dinámico, ya que depende tanto del rendimiento individual del elemento en cuanto a su fiabilidad y capacidad de mantenimiento, como del estado de funcionamiento de todos los elementos presentes en el mismo subsistema, y de su configuración funcional. En la metodología IEF, este análisis se logra mediante los KPI propuestos: el factor FPD que cuantifica la propagación del impacto que tiene el desempeño de un componente, especialmente una detención no programada, sobre el desempeño total del sistema (pudiendo este factor ser cercano a cero por ejemplo, si debido a una redundancia total, la propagación del fallo sobre el desempeño del sistema es despreciable en términos de disponibilidad) y el ICO que, para un desempeño sistémico conocido, cuantifica la proporción de cada elemento componente del sistema sobre el desempeño sistémico (a partir de la disponibilidad de cada elemento y de su factor FPD en relación a los demás elementos que afectan al sistema).

Después de llevar a cabo un análisis IEF completo, se debería ser capaz de contestar las siguientes preguntas: ¿Cuáles son los cuellos de botella del sistema? ¿Cuáles son los principales factores que explican la pérdida de la producción del sistema? ¿Cuál es el nivel de disponibilidad del sistema? ¿Dónde están las principales oportunidades de mejora?

3. METODOLOGÍA PROPUESTA

Esta metodología se estructura en cuatro etapas que se resumen en la Figura 1. La primera etapa gestiona y prepara los datos e información del proceso sujetos a análisis. La segunda etapa se encarga del cálculo de la fiabilidad y disponibilidad de cada elemento individual hasta obtener datos sistémicos de disponibilidad.

La tercera etapa toma los datos de disponibilidad del sistema y con ellos encuentra la influencia real de cada elemento en el sistema, es decir su ICO y su FPD. La cuarta y última etapa corresponde al análisis de los indicadores para la toma de decisiones.

3.1. ETAPA 1: DEPURADO Y GESTIÓN DE DATOS

Sin un suministro de información adecuado, el análisis de datos es tiempo perdido. Por tanto el primer paso de esta metodología implica la depuración y filtrado de los datos industriales con el fin de mejorar sus atributos, detectando la ausencia de valores y datos erróneos, discriminando datos correspondientes a distintos elementos y condiciones operacionales y evaluando en general la calidad de los registros [10].

En vista de lo anterior, es necesario diseñar un procedimiento para recabar los datos útiles del proceso, con el fin de tener datos fiables y representativos de cada elemento a analizar. Posteriormente el uso de técnicas estadísticas como el análisis de dominancia y percentiles significativos puede ser útil para filtrar los datos y lograr una base de datos depurada [11].

3.2. ETAPA 2: ANÁLISIS ASCENDENTE. ANÁLISIS CLÁSICO RAM DESDE EL ELEMENTO MÁS PEQUEÑO HACIA EL SISTEMA

Para llevar a cabo esta etapa, se desarrolla un análisis clásico de Diagrama de Bloques de Fiabilidad (RBD) [12,13] en el que se realiza un análisis de fiabilidad y disponibilidad del proceso por niveles. Comenzando con el cálculo de la fiabilidad y disponibilidad de cada elemento y dada su configuración lógico-funcional se asciende para el cálculo de la disponibilidad sistémica. Este proceso puede ser entendido como ir de "abajo - arriba" ya que parte del cálculo de los indicadores RAM del elemento de nivel más bajo y posteriormente estos indicadores se utilizan para construir los índices de todo el sistema complejo, bajo el uso de las relaciones lógicas de RBD [14, 15].

La disponibilidad corresponde a una proporción de tiempo que podría ser expresada como la probabilidad de que el equipo está disponible, cuando se requiere. De esta manera, y suponiendo que el equipo requerido siempre debe ser utilizado y que las órdenes de producción se inician inmediatamente después de un fallo, es posible definir la disponibilidad prevista de un elemento específico, como por ejemplo [14]:

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \tag{1}$$

Para la generación del análisis sistémico RBD, y para la obtención de la disponibilidad del sistema, se utilizan los modelos desarrollados por Dhillon [14] para las configuraciones de serie, redundancia total, *stand by*, redundancia parcial y fraccionamiento.

3.3. ETAPA 3: ANÁLISIS DESDE EL SISTEMA HASTA EL ELEMENTO. DETERMINACIÓN DEL DESEMPEÑO SISTÉMICO Y DEL IMPACTO DE LOS ELEMENTOS

Esta fase corresponde a un análisis de "arriba - abajo", proceso para el cálculo de los indicadores de impacto, a partir de la disponibilidad del sistema

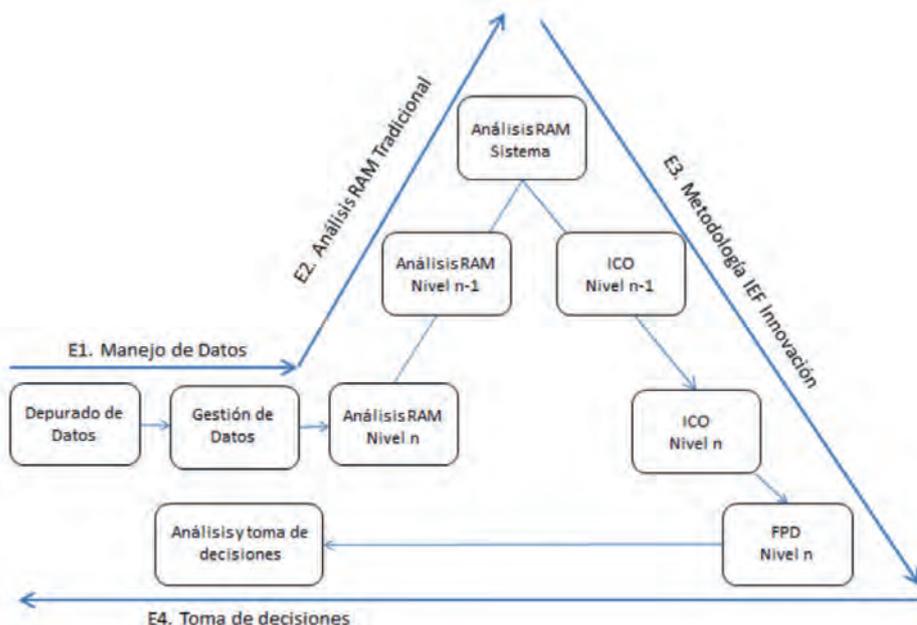


Fig. 1: Etapas de la Metodología IEF

hasta el elemento de nivel inferior. Así, es posible calcular el ICO (impacto esperado de criticidad operacional) que permite conocer la contribución del fallo de cada elemento a la pérdida de producción del sistema debido a su indisponibilidad, siendo la sumatoria de los ICO de todos los elementos el 100%.

Dado un sistema complejo compuesto por l niveles, desde $i=0$ hasta $i=r$, donde el $i=0$ corresponde al nivel del sistema en general, $i=1$ al nivel de los elementos "padres" en que inicialmente se divide el sistema (subsistemas), $i=2$ al nivel de los elementos "hijos" o sub-elementos del nivel anterior y así hasta el nivel r . Sea J el conjunto de elementos mantenibles del sistema; habrá desde $j=1$ hasta $j=n$ elementos en cada nivel i del sistema. El factor ICO de cada elemento en el sistema se determina a través de la descomposición del índice global y de cada uno de los subsistemas. El desglose del ICO de cada nivel se expresa con las ecuaciones 2, 3 y 4:

$$\text{Impacto de Criticidad Operacional (ICO)}_{\text{sistema } i=0} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n A_{ICO_{i,j}} = ICO_{i-1} \quad \forall i: 0, \dots, r; \quad \forall j: 1, \dots, n \quad (3)$$

$$\frac{ICO_{i,j}}{ICO_{i,j+1}} = \frac{(1 - A_{i,j})}{(1 - A_{i,j+1})} \quad \forall i: 0, \dots, r; \quad \forall j: 1, \dots, n \quad (4)$$

Dónde:

$ICO_{i,j}$: Es ICO para el elemento j (de 1 a n) que se encuentra en el nivel de descomposición i (de 1 a r).

$A_{i,j}$: Es la disponibilidad esperada para el elemento j (de 1 a n) que se encuentra en el nivel de descomposición i (de 1 a r).

En términos simples, el ICO muestra el resultado final de la contribución de cada elemento sobre el sistema, exponiendo el posible impacto de un fallo en la pérdida de capacidad de producción. Al considerar el nivel de detalle más bajo, esto es el sistema en su totalidad o nivel $i=0$, la suma de todos los ICO es 100% del sistema (ecuación 5).

$$\sum_{j=1}^n A_{ICO_{i,j}} = 1 \quad \forall i: 0, \dots, r; \quad (5)$$

Por último, una vez conocido el $ICO_{i,j}$ de cada elemento, su nivel de impacto se puede descomponer en dos aspectos principales: la frecuencia (por la falta de disponibilidad del elemento) y la consecuencia (a través del impacto del elemento según su configuración lógico funcional). Este último índice se llamará Factor de Propagación esperado de Detención $FPD_{i,j}$, el cual representa el efecto que causa una parada del elemento $i;j$ en el sistema (ecuación 6). El efecto de detener un elemento j puede tener diferentes resultados, dependiendo del estado de los demás elementos que se encuentran en el mismo nivel i .

$$FPD_{i,j} = \frac{ICO_{i,j} * (1 - A_{\text{system}})}{(1 - A_{i,j})} \quad (6)$$

Considerando una estructura sistema-subsistema-equipos, el algoritmo de cálculos para esta etapa sería el siguiente:

1. Calcular la suma de la indisponibilidad total de todos los subsistemas de cada nivel $i: j=1n1-Asub \forall i:1,\dots,r-1$
2. El ICO del sistema será $ICO_{\text{sis}} = 100\% (i=0)$
3. El ICO del subsistema ICO_{sub} será la proporción de impacto del subsistema con respecto al total de indisponibilidades, multiplicado por el ICO_{sis} lo que quedaría: $1-Asub/j=1n1-Asub \forall i:1,\dots,r-1$
4. Calcular la suma de la indisponibilidad de los equipos pertenecientes a un subsistema: $j=1n(1-Aequ) \forall r$. En caso de fraccionamiento, dicha indisponibilidad deberá multiplicarse por la capacidad de cada elemento.
5. El ICO del equipo ICO_{equ} será la proporción de impacto del equipo con respecto al total de indisponibilidades para el subsistema en análisis, multiplicado por el ICO_{sub} lo que quedaría: $1-Aequ/j=1n1-Aequ*ICO_{\text{sub}} \forall r$. En caso de fraccionamiento, es necesario multiplicar la indisponibilidad del equipo por la capacidad,
6. El FPD del equipo FPD_{equ} se calcula con la ecuación 6.

3.4. ETAPA 4: ANÁLISIS DE INDICADORES Y RESULTADOS

Esta fase recoge los resultados numéricos obtenidos en las etapas anteriores y los analiza para la toma de decisiones estratégicas. Los primeros análisis pueden ir enfocados en la cuantificación de la indisponibilidad del sistema. Dicha indisponibilidad será el elemento de análisis para determinar el aporte de cada equipo y subsistema, en términos de consecuencia de posibles fallos. Posteriormente, el análisis de los subsistemas y equipos con mayor ICO indican cuáles son los elementos más críticos y sobre los que debería enfocarse la gestión de activos con mayor énfasis. En esta etapa se propone la elaboración de un Gráfico de Dispersión IEF, el cual relaciona en su eje X la indisponibilidad de los equipos y en el eje Y su FPD. De acuerdo a la localización de los equipos dentro del gráfico es posible hacer una clasificación de los equipos para enfocar diversas acciones de mejora.

4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA IEF: PROCESO DE TRITURACIÓN DE MINERAL DE COBRE

4.1. ANTECEDENTES DEL CONTEXTO INDUSTRIAL

Una planta de trituración es una instalación compleja, que consta de una variedad de elementos. La elección del tipo y el diseño de una planta de trituración se determina principalmente por su importancia en el proceso de producción del cobre.

El proceso de obtención del cobre, comienza con la extracción del material desde la mina, el que se transporta a través de camiones al proceso de trituración primario, posteriormente a través de correas transportadoras es derivado al triturador secundario, para culminar el proceso de conminución en el triturador terciario. Una vez finalizado el proceso de trituración, el material es tratado con el curado ácido en correas transportadoras, para culminar el proceso en las pilas de lixiviación. El presente estudio, se focalizará en el proceso de trituración, en particular para la fase más crítica del proceso que es el de trituración secundaria.

- Trituración Primaria: este proceso tiene como objetivo el reducir el tamaño del material a un diámetro inferior a 8 pulgadas, de manera homogénea. En la fase previa al triturador primario, se encuentra un equipo Picador de Rocas, que facilita la entrada de las rocas de mayor tamaño. Este

proceso tiene una capacidad de 15.000 ton/h. El material triturado es trasladado por una Correa Transportadora de 1 km hacia el proceso de trituración secundaria.

- **Trituración Secundaria:** este proceso es alimentado por la producción del triturador primario y se compone por cuatro líneas independientes, cuyo objetivo es obtener un 100% de la granulometría bajo 1 pulgada, la cual es seleccionado por un harnero; todo el material que no cumple es procesado en el triturador secundario, con un proceso de retroalimentación repetitivo, hasta lograr el cumplimiento del objetivo.

Cada una de las líneas de trituración secundaria se compone por cuatro equipos: Alimentador, Correa, Harnero y Triturador. La capacidad de cada una de las líneas es descrita en la Tabla 2.

Trituración Secundaria	Capacidad [ton/h].
Línea 1	5.250
Línea 2	6.000
Línea 3	4.500
Línea 4	4.500

Tabla 2: Capacidad Líneas de Trituración Secundaria

Al observar las capacidades de las líneas y la forma independiente de operación entre ellas, se puede establecer que la configuración de este proceso es la de un fraccionamiento con capacidad ociosa [15], permitiendo operar en condiciones excepcionales, a menos carga de la requerida ya que la capacidad nominal del proceso de trituración secundaria corresponde a 20.250 [ton/h]. Tales sistemas pueden representar configuraciones de carga compartida con exceso de capacidad y niveles de trabajo flexibles, permitiendo asimismo que los equipos presenten diferente comportamiento de fallos.

4.2. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA IEF

Para el desarrollo de este artículo, se han utilizado los datos reales de mantenimiento de los equipos principales de una línea de trituración secundaria, de una planta de trituración minera situada en Chile.

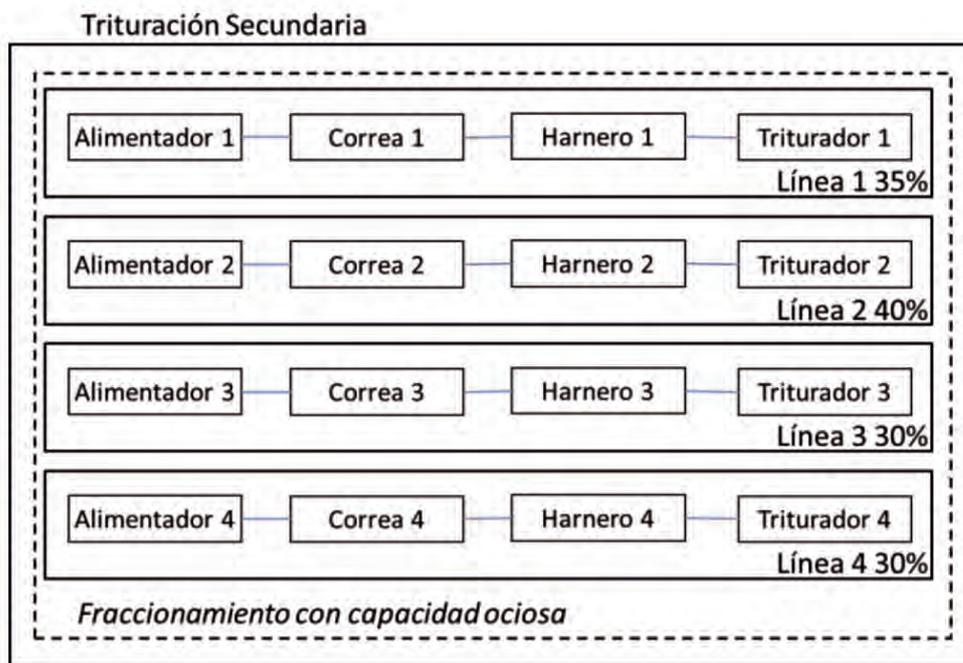


Fig. 2: Diagrama del proceso de Trituración Secundaria

4.2.1. Etapa 1. Depurado y gestión de datos

Los datos del proceso a analizar han sido recopilados utilizando una metodología estructurada propuesta por Ballou et al [16]. Posteriormente, los datos han sido limpiados para trabajar solamente con información de calidad asegurada, eliminando datos no significativos e incompletos, con el soporte de los expertos de la empresa. Analizando la data histórica de intervenciones de mantenimiento de los equipos del proceso de trituración, se pudo verificar en la mayoría el concepto de independencia y análisis de tendencia (descartar envejecimiento). Se determinó bajo la hipótesis nula de homogeneidad de Poisson, utilizando el estadístico X^2 (chi cuadrado) distribuido con 2 (n-1) grados de libertad, donde la hipótesis no es rechazada con un 5% de nivel de significancia. Esto se cumple para todos los equipos, indicando los parámetros de la distribución de Weibull respectivos en la Tabla 3.

4.2.2. Etapa 2. Análisis clásico RAM ascendente

El proceso de trituración secundaria se ha descompuesto en cuatro subsistemas, de acuerdo con la lógica del proceso global (configuración de fraccionamiento con capacidad ociosa). Debido a que la suma de las capacidades de las líneas excede un 35% de la capacidad requerida, la cual queda definida por la trituración primaria, 15.000 toneladas por hora. La Figura 2, muestra la configuración lógica del proceso de trituración secundaria. Donde el porcentaje indicado representa la capacidad de cada línea o subsistema, sobre la capacidad requerida.

La Tabla 3, muestra los datos iniciales de fiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad para cada uno de los 16 equipos del proceso. La base para la determinación de los modelos de fiabilidad, es a través de los parámetros α y β de la distribución de Weibull. Estos parámetros fueron obtenidos desde los sistemas de información de mantenimiento de la empresa en estudio. Aplicando los modelos de RBD [14, 15] para el cálculo de la disponibilidad de las líneas (A líneas) y el de fraccionamiento con capacidad ociosa [17] para la disponibilidad del sistema (A sist), se obtiene:

Del análisis RAM ascendente se observa que la disponibilidad esperada de todo el sistema de trituración secundaria corresponde a casi un 96%; destacando la línea 3 por ser el subsistema de menor disponibilidad (83,13%) y dentro de la misma línea 3, el triturador se aprecia como el equipo más indisponible.

4.2.3. Etapa 3. Análisis descendente y cálculo de indicadores FPD e ICO

Se calcula el impacto de cada equipo, entendido como el porcentaje de pérdida de disponibilidad, producción o capacidad operativa, en el nivel superior $i=0$, siendo este equipo un componente de un subsistema o un subsistema $i \neq 0$. Este impacto es descrito por los indicadores FPD e ICO. Por la lógica descrita, el ICO y el FPD del sistema (nivel superior máximo o $i=0$) será siempre 100%. El ICO es la contribución de cada elemento j en la disponibilidad del sistema, a causa de una falta de eficacia reflejada en una posible pérdida de producción; el Factor de Propagación de Detención (FPD) es el efecto esperado de una deten-

	Configuración	α	β	MTR	A eq	A líneas	A sist
Trituración Secundaria	Fraccionamiento con ociosa						95,93%
Línea 1 CH2	35%					85,52%	
Alimentador 1 CH2	Serie	414,75	1,97	11,92	96,86%		
Correa 1 CH2	Serie	188,22	1,86	4,13	97,59%		
Harnero 1 CH2	Serie	1.727,09	1,56	6,93	99,56%		
Triturador 1 CH2	Serie	210,85	1,57	19,00	90,88%		
Línea 2 CH2	40%					85,55%	
Alimentador 2 CH2	Serie	343,97	1,91	14,42	95,49%		
Correa 2 CH2	Serie	230,49	1,57	7,68	96,42%		
Harnero 2 CH2	Serie	1.236,10	1,49	6,85	99,39%		
Triturador 2 CH2	Serie	214,35	1,39	13,62	93,49%		
Línea 3 CH2	30%					83,13%	
Alimentador 3 CH2	Serie	369,36	1,56	8,02	97,64%		
Correa 3 CH2	Serie	189,75	1,42	6,83	96,20%		
Harnero 3 CH2	Serie	1.413,29	1,48	6,29	99,51%		
Triturador 3 CH2	Serie	143,92	1,98	15,86	88,94%		
Línea 4 CH2	30%					85,88%	
Alimentador 4 CH2	Serie	629,60	1,79	7,28	98,72%		
Correa 4 CH2	Serie	113,58	1,42	5,24	95,17%		
Harnero 4 CH2	Serie	1.116,12	1,46	4,73	99,53%		
Triturador 4 CH2	Serie	136,73	1,87	10,79	91,83%		

Tabla 3: Análisis de disponibilidad por equipos, líneas y sistema de trituración secundaria

Nivel i		ICO Sist	ICO líneas	ICO Eq	FPD Eq
0	Trituración Secundaria	100,00%			
1	Línea 1 CH2		25,15%		
2	Alimentador 1 CH2			5,23%	6,77%
2	Correa 1 CH2			4,01%	6,77%
2	Harnero 1 CH2			0,74%	6,77%
2	Triturador 1 CH2			15,17%	6,77%
1	Línea 2 CH2		28,69%		
2	Alimentador 2 CH2			8,51%	7,67%
2	Correa 2 CH2			6,75%	7,67%
2	Harnero 2 CH2			1,15%	7,67%
2	Triturador 2 CH2			12,28%	7,67%
1	Línea 3 CH2		25,12%		
2	Alimentador 3 CH2			3,35%	5,77%
2	Correa 3 CH2			5,40%	5,77%
2	Harnero 3 CH2			0,69%	5,77%
2	Triturador 3 CH2			15,68%	5,77%
1	Línea 4 CH2		21,03%		
2	Alimentador 4 CH2			1,83%	5,80%
2	Correa 4 CH2			6,89%	5,80%
2	Harnero 4 CH2			0,66%	5,80%
2	Triturador 4 CH2			11,65%	5,80%
	Sumatoria		100%	100%	

Tabla 4: Cálculo ICO y FPD

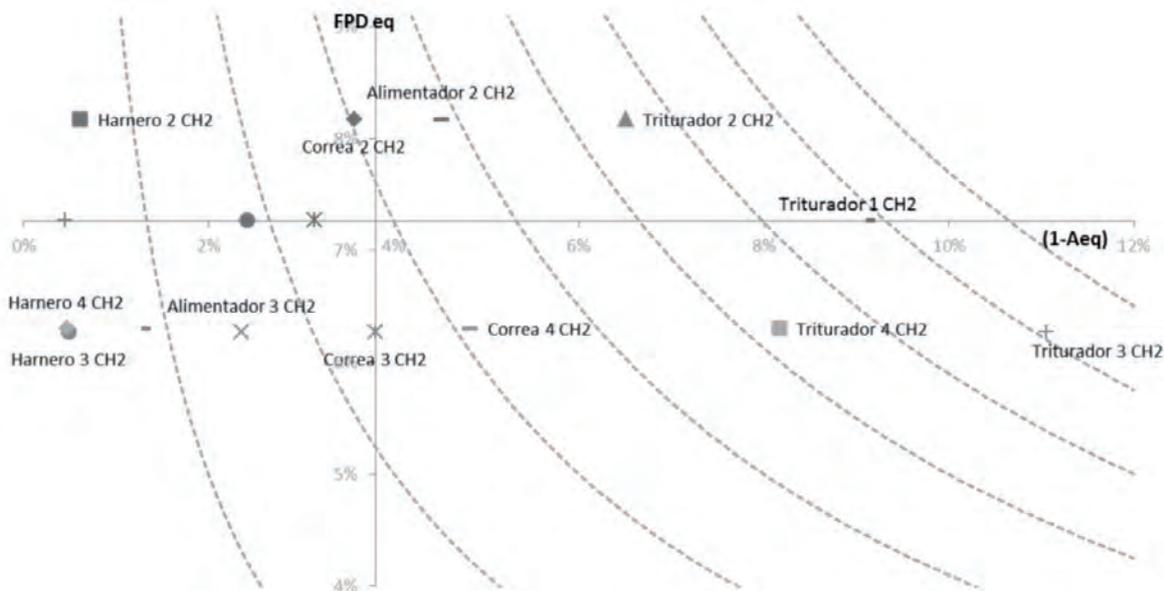


Fig. 3: Gráfico Dispersión para Metodología IEF

ción de cada elemento sobre el sistema. A partir de las ecuaciones 2-6 y de los algoritmos expuestos en la sección 3.2 y en 3.3 se hace el cálculo de los indicadores ICO y FPD para el caso de estudio, los cuales se muestran en la Tabla 4.

Los resultados de la Tabla 4 muestran que, aunque la línea 2 es la línea de trituración con mayor ICO, como equipo es el triturador 3, de la línea 3 el que tiene mayor ICO o impacto esperado de criticidad. Este equipo posee la mayor indisponibilidad de todo el sistema ($A=88,94\%$), sin embargo su capacidad es menor que la de los trituradores de las líneas 1 y 2 (ver Tabla 2). La línea con el menor ICO es la 4, que además tiene el equipo con el menor ICO del sistema (harnero) y el triturador con menor ICO con respecto a los trituradores de las otras líneas.

4.2.4. Etapa 4. Análisis de indicadores y resultados

Una vez que se cuenta con los datos de disponibilidad e indisponibilidad globales y por elemento, así como con los valores de los indicadores ICO y FPD es posible analizar las implicancias de esta información para la toma de decisiones.

La Figura 3 a través del Gráfico de Dispersión IEF, facilita la interpretación de los conceptos y del índice ICO, teniendo en cuenta en el eje X la falta de disponibilidad de equipos (indisponibilidad) y en el eje Y el FPD. El motivo de esta disposición es la evaluación estándar que se realiza de un riesgo operacional, que considera el producto de dos factores: frecuencia y consecuencia. Quedando los equipos más críticos para el funcionamiento sistémico por su factor de propagación e indisponibilidad, en el área más noreste posible del diagrama. Es fácil de confirmar, a través de las curvas de iso-ICO, que los trituradores ocupan los primeros lugares de mayor impacto en el sistema (en el orden por número de triturador 3, 1, 2 y 4), el quinto lugar es para el alimentador de la línea 2 y el sexto para la correa de la línea 4.

Respecto del FPD se puede establecer claramente que los factores más altos están en las líneas de mayor capacidad (2 y 1 respectivamente). Al estar en presencia de una configuración con cierto grado de redundancia (fraccionamiento con capacidad ociosa) el FPD es de suma utilidad, ya que por ejemplo el triturador 2 representa un 40% de la capacidad productiva requerida, pero si falla y las otras tres líneas se mantienen operativas, el sistema

de trituración secundaria solo pierde un 5% de su capacidad, obviamente al fallar más equipos de otras líneas de manera simultánea, la capacidad del sistema desciende, pero siempre de manera suavizada al contar con capacidad ociosa. EL FPD explica todas estas situaciones, estableciendo que en términos esperados una detención de cualquier equipo de la línea 2, implicará la pérdida un 7,67% promedio para el sistema.

Teniendo en cuenta las cuestiones clave que se presentan en la sección Planteamiento del problema, es fácil dejar claro que el subsistema con mayor ICO (subsistema 2) es el que tiene mayor impacto en la operatividad del sistema, siendo referido éste a más del 28% de la indisponibilidad esperada. Sin embargo como equipo individual es el triturador 3 el que más influye en la indisponibilidad sistémica, correspondiendo ésta en más del 15% a interrupciones en dicho triturador.

Ahora con la disponibilidad esperada de cada equipo, subsistema y del sistema en general, así como con el conocimiento del impacto de cada elemento es posible hacer un pronóstico más exacto de la capacidad del sistema para desarrollar un plan y control de la producción. Posteriormente, es posible aplicar otras metodologías de mejoras de procesos, tales como la propuesta de Eguren et al. [17].

5. CONCLUSIONES

En relación con los objetivos planteados al inicio, orientados a proponer una metodología que cubra un vacío de aplicación práctica y científica, se puede concluir que la metodología propuesta (IEF) es capaz de generar indicadores útiles para el análisis y posterior mejora en el desempeño de los sistemas productivos. Esto en términos de la disponibilidad de sus equipos. Así como para la priorización, focalización de las actividades y toma de decisiones relacionadas con la gestión de activos, todo independientemente del tipo de industria del que se trate y de la disposición lógico-funcional de los componentes del sistema.

La propuesta metodológica IEF consta de cuatro etapas: la primera que gestiona y prepara los datos a analizar, la segunda que de forma clásica calcula la fiabilidad y disponibilidad operacional de cada elemento y del sistema general, la tercera que encuentra

el impacto en la criticidad operacional (ICO) y el factor de propagación del tiempo de detención esperado (FPD) de cada uno de los equipos sobre el sistema y la última que obtiene mediante un gráfico de dispersión "indisponibilidad vs FPD" la interpretación de los resultados para la toma de decisiones. Cada una de las mencionadas etapas se ilustra con el caso de análisis a un sistema de trituración de cobre, cuyos resultados finales arrojan información relevante para evaluar el diseño y el rendimiento de la planta, lo cual por supuesto se puede posteriormente traducir en beneficios económicos.

En general, después de aplicar la metodología es posible obtener los siguientes elementos de información:

- Identificar los activos que tienen el ICO más alto, lo cual es relevante para concentrar los esfuerzos en ellos dado su impacto potencial. Recordemos que el ICO descubre cuál es el subsistema o equipo con mayor impacto en la operatividad del sistema, asignando el % de la indisponibilidad total correspondiente
- Identificar los equipos de mayor criticidad en el sistema (frecuencia x consecuencia), entendiendo en este caso particular que la consecuencia medida es netamente operacional, por ende basada en la indisponibilidad individual y sistémicamente impactada de cada equipo. Este análisis se facilita por medio de un gráfico de dispersión, que relaciona en su eje X la indisponibilidad de los equipos (interpretada como la frecuencia) y en el eje Y el FPD (entendido como la consecuencia). En dicho gráfico es posible apreciar que para una misma configuración lógica, los elementos del mismo subsistema tendrán un mismo FPD, siendo la indisponibilidad esperada de cada elemento el factor diferenciador para priorizar un equipo sobre otro. También es posible visualizar que para una misma indisponibilidad entre equipos, la configuración lógico-funcional, representada por el FPD hace la diferencia en su criticidad.

Dado lo anterior, las acciones del plan de gestión de activos que emanen de esta metodología pueden ser dirigidas a la fiabilidad y mantenibilidad de los elementos presentes en la zona de la derecha (eje X) del gráfico, es decir los más indisponibles. Lo que implicaría la redefinición de su estrategia de mantenimiento, de los procedimientos de mantenimiento, y el análisis de piezas de repuesto. En tanto, para los elementos situados en la zona más alta (eje Y) del gráfico de dispersión, es decir para aquellos con mayor FPD, las acciones pueden estar relacionados en reducir el impacto del elemento, por ejemplo: incluyendo mejoras en el diseño, la incorporación de redundancia y de exceso de capacidad, cuando sea posible.

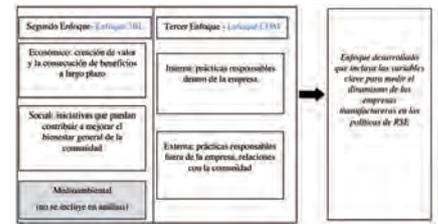
La contribución de esta metodología tiene un alto componente económico, ya que el determinar adecuadamente la disponibilidad de un sistema industrial ayuda a conocer su capacidad real de producción y por lo tanto los beneficios potenciales. Por otro lado, el identificar las oportunidades de mejora y asignar los recursos de mantención a los equipos y sistemas más críticos (y no sólo a aquellos de mayor capacidad productiva) genera ahorros en el presupuesto de mantención, pero además en la consecuente disminución en tiempos de ineficiencia, producción defectuosa, pérdidas y mermas. Finalmente, es importante destacar que por su carácter genérico, la metodología de IEF se podría incorporar en cualquier base de datos de un Sistema informático de gestión de mantenimiento - CMMS para tener una evaluación de impacto automatizada.

BIBLIOGRAFÍA

(Endnotes)

- 1 Daylan B, Ciliz N. "Life cycle assessment and environmental life cycle costing analysis of lignocellulosic bioethanol as an alternative transportation fuel". *Renewable Energy* 2016. Vol.89 p.578-587. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.059>
- 2 Gang W, Wang S, Xiao F, Gao D. "Robust optimal design of building cooling systems considering cooling load uncertainty and equipment reliability". *Applied Energy* 2015. Vol.159 p.265-275. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.070>
- 3 Koontz A, Weihrich H. *Administración: una perspectiva global*. México: McGraw-Hill / Interamericana de México 2014. ISBN 978-607-15-0759-4.
- 4 Crespo A, Moreu P, Sola A and Gómez J. "Criticality Analysis for Maintenance Purposes: A Study for Complex In-service Engineering Assets". *Quality and Reliability Engineering International* 2015. Published online in Wiley Online Library. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/qre.1769>
- 5 Baraldi P, Compare M, Zio E. "Component ranking by Birnaum importance in presence of epistemic uncertainty in failure event probabilities". *IEEE*. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TR.2013.2240885>
- 6 Wang, W., Loman, J., Vassiliou, P. "Reliability importance of components in a complex system". *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*. Los Angeles, California, USA, January 26-29, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/RAMS.2004.1285415>
- 7 Kristjanpoller F, Viveros P, Crespo A, Grubessich T and Stegmaier R. "RAM-C: A novel methodology for evaluating the impact and the criticality of assets over systems with complex logical configurations". In: *The Annual European Safety and Reliability Conference (ESREL)*, Zurich, Switzerland, 7 - 10 September 2015.8-84-92970-17-9
- 8 Guillemette M, Laroche M, Cadieux J. "Defining decision making process performance: Conceptualization and validation of an index". *Information & Management* 2014. Vol 51 p.618-626. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.im.2014.05.012>
- 9 Chai J, Liu E, Ngai W. "Application of decision-making techniques in supplier selection: A systematic review of literature". *Expert Systems with Applications* 2013. Vol. 40 p.3872-3885. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2012.12.040>
- 10 Chapman AD. "Principles of Data Quality", version 1.0. Report for the Global Biodiversity Information Facility. Copenhagen: GBIF, 2005.
- 11 Carnero M. "The control of the setting up of a Predictive Maintenance Programme using a system of indicators". *Omega-International Journal of Management Science* 2004, Vol. 32, p. 57-75.
- 12 Rausand M, Hoyland A. "System reliability theory: models, statistical methods, and applications". 3rd ed. New York: Wiley; 2003.
- 13 Guo H, Yang X. "A simple reliability block diagram method for safety integrity verification". *Reliability Engineering System Safety* 2007. Vol. 92 p.1267-1273. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2006.08.002>
- 14 Dhillon B. "Maintenance Engineering a Modern Approach". Boca Raton: CRC Press LLC; 2002. ISBN 1-58716-142-7. p. 78.
- 15 Kristjanpoller F, Crespo A, Viveros P, Mena R, Stegmaier R. "A novel methodology for availability assessment of complex load sharing systems". *The Annual European Safety and Reliability Conference (ESREL)*. Wroclaw, Poland. Sept 14-18, 2014.
- 16 Ballou D, Madnick S, Wang R. "Assuring Information Quality". *Journal of Management Information Systems* 2003, Vol. 20, p.9-11.
- 17 Eguren-Egiguren J, Goti-Elordi A, Pozueta-Fernandez L. "Design, application and evaluation of a model for process improvement in the context of mature industrial sectors. Case study." *DYNA* 2011 Vol.86-1 p.59-73. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/3734>

Responsabilidad social empresarial en la industria manufacturera: ámbitos social y económico



Corporate social responsibility in manufacturing sector: social and economic dimensions



Cristina López-Cózar-Navarro y Sonia Benito-Hernández

Universidad Politécnica de Madrid. Dpto. de Economía Agraria, Estadística y Gestión de Empresas. Ciudad Universitaria. Av. Complutense, s/n - 28040 Madrid. Tfno: +34 913365778

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8089> | Recibido: 20/06/2016 • Evaluado: 27/06/2016 • Aceptado: 17/10/2016

ABSTRACT

- This paper examines what the key issues related to the actions of corporate social responsibility by companies belonging to the Spanish manufacturing sector. Traditionally, issues of respect for the environment and compliance with legal regulations have been studied in depth in this sector, however, few studies have focused on economic and social aspects of corporate social responsibility. For this reason, the aim of the present study is to analyze a set of variables included in these two dimensions, in order to determine which are the most representative of corporate social responsibility actions taken by manufacturing companies in general, not focused on subsector. Thus, drawing on previous literature on corporate social responsibility and also studies that examine different approaches on the dimensions thereof, many of which are listed in the literature review, a theoretical model is proposed, according to the empirical results obtained by the technique of factor analysis, which enables to identify three key aspects called "Community relationships", "Growth potential" and "Value creation".
- **Keywords:** Corporate social responsibility, social dimension, economic dimension, manufacturing, stakeholders, factor analysis.

RESUMEN

Este trabajo examina cuáles son los aspectos clave relacionados con las actuaciones de responsabilidad social empresarial que realizan las empresas pertenecientes al sector manufacturero español. En este sector se han analizado con más esfuerzo los aspectos relacionados con el respeto al medioambiente y el cumplimiento de las normativas legales relativas al entorno de la empresa, descuidando los aspectos económicos y sociales de la responsabilidad social corporativa. Por este motivo, el presente trabajo pretende estudiar un conjunto de variables incluidas dentro de estas dos dimensiones, con el propósito de averiguar cuáles de ellas son las más representativas de las actuaciones que en materia de responsabilidad social corporativa realizan las empresas industriales en general. Así, basándonos en la literatura previa sobre responsabilidad social empresarial, y a partir de los trabajos en los que se plantean diferentes enfoques sobre las dimensiones de la misma, que aparecen recogidos en la revisión de la literatura, se propone un modelo teórico, el cual, según los resultados empíricos obtenidos mediante la técnica del análisis factorial, permite

distinguir tres aspectos clave a los que se ha denominado "Relaciones con la comunidad", "Potencial de crecimiento" y "Creación de valor".

Palabras clave: Responsabilidad social empresarial, dimensión social, dimensión económica, sector manufacturero, grupos de interés, análisis factorial.

1. INTRODUCCIÓN

La industria manufacturera es uno de los sectores más dinámicos de la economía mundial, desempeña un papel muy importante a la hora de fomentar el crecimiento sostenible, crear puestos de trabajo y encontrar soluciones a los nuevos retos de la sociedad. Sin embargo, en el siglo XXI el peso de la industria ha disminuido en Europa. De hecho, uno de los desafíos de la Unión Europea es aumentar la aportación de la industria al crecimiento, desde el nivel actual del 15,6% del PIB de la UE, hasta el 20% en 2020. La industria manufacturera es también uno de los principales motores de la economía española. Sectores como el siderúrgico, la metalurgia, el químico o la automoción cuentan en España con un importante peso en cuanto a generación de riqueza y de empleo.

Las empresas manufactureras de los países occidentales se enfrentan al reto de mantenerse competitivas en un entorno muy diferente al existente hace una década, caracterizado por la presencia de nuevos competidores, mercados globalizados, procesos de consolidación continuos en todos los subsectores, crecientes exigencias en coste-calidad, crecimiento sostenible, etc. En este sentido, la actual coyuntura económica ha despertado en la sociedad una preocupación generalizada por el comportamiento de las empresas en su actividad cotidiana. Con el objetivo de lograr un desarrollo sostenible, es necesario revisar sus actuaciones en cuestiones como políticas de recursos humanos, medioambientales o fiscales, entre otras. Las empresas cada vez son más conscientes de la necesidad de tener un comportamiento socialmente responsable y, por tanto, cada vez son más propensas a trabajar activamente por la responsabilidad social empresarial (RSE) [1].

Todo ello ha provocado que en los últimos años se haya incrementado aún más, si cabe, el interés por la RSE. Esta preocupación tanto en el ámbito empresarial, como en el político, y en la sociedad en general, también se deja sentir en el académico, motivando un amplio número de investigaciones y publicaciones al respecto. Siguiendo a [2], se trata de un concepto que se analiza desde diferentes enfoques: como una cuestión ética, desde la perspectiva

social, a partir de las relaciones con los *stakeholders* (partes interesadas) o dentro del marco de la estrategia de negocio, planteando que las políticas de RSE pueden mejorar la competitividad de la empresa y facilitar la consecución de ventajas competitivas. Por lo tanto, aunque la RSE se contemplaba tradicionalmente como un concepto agregado, los estudios más recientes muestran que es fundamentalmente multidimensional, que alcanza a distintos actores e incluye un amplio y variado conjunto de comportamientos y actitudes dentro de la empresa que afecta a los recursos, los procesos y los productos [3, 4].

Por todo lo expuesto, y partiendo de la hipótesis de que la importancia de las dimensiones que definen la RSE de las empresas difiere dependiendo del sector de actividad la misma [5], esta investigación pretende analizar los aspectos dentro de los ámbitos social y económico que mejor explican el comportamiento socialmente responsable de la empresa manufacturera.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. CONCEPTO Y DIMENSIONES DE LA RSE

Después de más de seis décadas de discusión, tanto en el ámbito académico como en el empresarial, sigue creciendo el interés por la RSE [1, 2]. Sin embargo, todavía resulta difícil encontrar una definición ampliamente aceptada, más bien al contrario, existen diferentes terminologías y múltiples teorías y enfoques [6]. [7] fue uno de los primeros autores en definir la RSE como la obligación de los empresarios a adoptar políticas, tomar decisiones y emprender acciones que se consideren deseables en términos de los objetivos y valores de la sociedad. A partir de esta primera aproximación, numerosos autores han propuesto diferentes definiciones; en este sentido, [8] recoge la evolución del concepto desde los años cincuenta hasta finales del siglo XX.

Por su parte, en 2001, la Comisión Europea en el Libro Verde "Fomentar un marco europeo para la RSE en Europa" [9] propone una de las definiciones que mayor aceptación ha tenido, considerándola como "la integración voluntaria, por parte de las empresas, de las preocupaciones sociales y medioambientales en sus operaciones comerciales y sus relaciones con sus interlocutores". En esta misma línea, en el año 2005, el Foro de Expertos en RSE concluye que, además de que la empresa cumpla de manera estricta las obligaciones legales vigentes, la RSE implica también la integración voluntaria en su gobierno, en su estrategia, en sus políticas y procedimientos, de las preocupaciones sociales, laborales, medioambientales y de respeto a los derechos humanos que surgen de la relación con los *stakeholders*, asumiendo así las responsabilidades de las consecuencias e impactos que se derivan de sus acciones. Años más tarde, en 2011, la propia Comisión Europea renueva la definición propuesta anteriormente, haciendo alusión a la responsabilidad de las empresas por su impacto en la sociedad, y señalando la necesidad de colaborar con todos los *stakeholders* para "integrar las preocupaciones sociales, medioambientales y éticas, el respeto de los derechos humanos y las preocupaciones de los consumidores en sus operaciones empresariales y su estrategia básica".

Por lo tanto, la RSE es considerada como las acciones voluntarias emprendidas por las empresas hacia sus empleados, la sociedad y el medio ambiente [10]; esto significa tener en cuenta, no solo los intereses de los accionistas, sino de todos los *stakeholders* con los que interactúa la organización. Sin embargo, un enfoque sincero debe considerar no sólo la identificación y evaluación de las responsabilidades de la empresa, sino también su capacidad de respuesta a la hora de implementar nuevas políticas y nue-

vos procesos operativos, además de un examen de los resultados en términos de los impactos económicos, sociales y ambientales provocados por la organización [11, 12]. Sin una visión holística, las empresas pueden simplemente analizar y definir un cambio de responsabilidades sin adoptar un enfoque estratégico y coherente a las nuevas políticas y procesos [13].

Así mismo, dada la diversidad de definiciones, también en relación a los distintos aspectos que incluye la RSE, existen diferentes enfoques en la literatura [14, 15]. [16] propone que las empresas tienen que satisfacer diferentes expectativas que incluyen componentes económicos, legales, éticos y filantrópicos, y lo representa en la llamada "Pirámide de la responsabilidad social corporativa". Según este autor, las responsabilidades económicas se refieren a que la empresa tiene que ser rentable, y esta es precisamente la base sobre la que descansan todas las demás; en segundo lugar, hace alusión a las responsabilidades legales (obedecer la ley), pues es la codificación del bien y del mal, y por tanto, hay que respetar las reglas (las responsabilidades éticas, en el sentido de hacer lo correcto, justo y equitativo, y evitar hacer daño); y finalmente, las responsabilidades filantrópicas, que significa ser un buen ciudadano, contribuyendo con recursos a la comunidad y a mejorar la calidad de vida. Este planteamiento ha tenido amplia difusión y es compartido y ampliado por numerosos autores. Años más tarde, [17] avanza una propuesta alternativa señalando tres dimensiones fundamentales: responsabilidades económicas, legales y éticas.

Otro de los enfoques más aceptados es el que propone una triple vertiente: económica, social y ambiental, denominada *triple bottom line* [18]. Así, las responsabilidades de la empresa son las siguientes [19]: en primer lugar, la responsabilidad económica se refiere a la creación de valor y la consecución de beneficios a largo plazo. La empresa tiene que asegurar una rentabilidad que garantice su supervivencia, sin embargo, frente a la idea de que la única responsabilidad de la empresa es la maximización de valor para el accionista, otros enfoques apuntan a la necesidad de tener en cuenta los intereses de otros grupos: hay que crear valor para los clientes, mediante la correcta atención de sus demandas, ofreciendo bienes y servicios de calidad a precios competitivos; para los proveedores, pagando precios justos por sus productos; y para los empleados, remunerando su trabajo con salarios justos, ofreciéndoles seguridad y estabilidad laboral, y favoreciendo su formación. En segundo lugar, la responsabilidad social se refiere al respeto tanto de las leyes, como de las costumbres y la cultura de la sociedad en la que opera la empresa, así como a la actitud de implicarse activamente con el entorno, adoptando iniciativas que puedan contribuir a mejorar el bienestar general de la comunidad. Finalmente, la responsabilidad ambiental supone que las empresas deben realizar sus actividades sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras. Las actuaciones de las empresas tienen un impacto sobre el medio ambiente (consumo de recursos naturales, contaminación, etc.), pero debe procurar minimizar dicho impacto y contribuir al desarrollo sostenible.

Por su parte, la Comisión de las Comunidades Europeas, en el citado Libro Verde (2001), propone distinguir entre una dimensión interna y otra externa de la RSE para comprender mejor los diferentes elementos que la componen. La primera se refiere sobre todo a cuestiones relacionadas con el bienestar de los trabajadores. En particular, destacan aspectos como políticas de formación, salud e higiene en el trabajo, bienestar general de los trabajadores y calidad de los productos y servicios ofrecidos por la empresa. [20, 21]. La dimensión interna, por tanto, hace referencia a las decisiones y actuaciones que la empresa puede controlar de forma directa en su dinámica habitual de funcionamiento.

Respecto a la dimensión externa de la responsabilidad social incluye una amplia gama de prácticas centradas en terceras personas ajenas a la organización [20, 21, 22]. Así, se refiere a las relaciones de la empresa con la comunidad local, en el sentido en que las empresas contribuyen al desarrollo de las comunidades en que se insertan, proporcionando puestos de trabajo, prestaciones e ingresos fiscales. Relaciones con los socios comerciales, los proveedores y los consumidores, pues se espera que las empresas intenten ofrecer de manera eficaz, ética y ecológica los productos y servicios que los consumidores necesitan y desean. Y en general, relaciones de la empresa con otras organizaciones.

2.2. LA RSE EN EL SECTOR MANUFACTURERO

Estas dimensiones de la RSE planteadas en los distintos modelos no han sido estudiadas con la misma intensidad en el sector manufacturero, dado que la actividad de las empresas que forman este sector tiene efectos directos sobre el medio ambiente, tales como consumo de recursos naturales, emisiones, vertidos y residuos.

La relación de sus políticas de RSE con la gestión de dichos impactos y con el cumplimiento de normativas legales es un tema muy interesante y ampliamente estudiado, obteniendo resultados remarcables y sugestivos [23, 24, 25].

Por su parte, aunque es mucho más limitada la investigación en las dimensiones social y económica de la RSE, es posible encontrar trabajos que han estudiado dichas dimensiones para subsectores concretos dentro de la industria manufacturera; por ejemplo, para la industria del papel [26] o para la industria petrolera [27]. Asimismo, otros estudios se han centrado en algún aspecto en particular, como la relación con los recursos humanos [28]. Sin embargo, no se han encontrado trabajos que analicen la industria manufacturera de forma global, centrándose en los ámbitos social y económico de manera conjunta. Por este motivo, se propone estudiar el siguiente modelo teórico, examinando diversos aspectos incluidos dentro de estas dos dimensiones, tales como calidad, innovación, empleados, relaciones con la comunidad, entre otros.

2.3. PROPUESTA DE ESTUDIO

A la vista de las diferentes perspectivas sobre las dimensiones de la RSE propuestas en los marcos referenciales descritos, este trabajo pretende plantear un enfoque que recoja de forma más

concreta y sencilla cuáles son las dimensiones que mejor definen las actuaciones de responsabilidad social en el sector manufacturero. Los modelos propuestos son generalistas y, dada la importancia de este sector en la economía, es interesante poder aclarar y distinguir cuáles son los principales aspectos asociados a él en concreto.

El presente trabajo, como se ha comentado, se centra en los ámbitos económico y social. Para ello se han definido una serie de aspectos relacionados con dichos ámbitos, de tal forma que puedan posteriormente simplificarse para detectar qué aspectos son los más explicativos del dinamismo que tienen las empresas manufactureras en las políticas de RSE.

La Figura 1 muestra visualmente el modelo propuesto.

3. METODOLOGÍA

Este estudio ha utilizado los datos de la *Encuesta sobre Estrategias Empresariales* (ESEE). La ESEE es una encuesta estadística realizada por la Fundación SEPI que recoge datos anuales de empresas manufactureras españolas sobre diversos aspectos relacionados con su comportamiento estratégico y su toma de decisiones, sus resultados y cuentas financieras. Una de las características comunes del conjunto de datos es que las empresas que participan en el cuestionario son cuidadosamente seleccionados de acuerdo con un método de muestreo selectivo. Aunque esta fuente de información contiene datos desde 1990, el presente estudio se ha llevado a cabo para una muestra de 1.751 empresas manufactureras españolas con datos del año 2012. En la Tabla 1 se recogen las variables para medir el dinamismo de la RSE en las empresas manufactureras.

3.1. ANÁLISIS METODOLÓGICO

El estudio empírico que se presenta tiene un carácter exploratorio y descriptivo y para su realización se ha utilizado el método del análisis factorial, una técnica estadística contrastada para poder alcanzar los propósitos que se plantean en este trabajo [29, 30]. El análisis factorial exploratorio es considerado una importante herramienta en la investigación en ciencias sociales [31], y en particular, existen precedentes de su aplicación para el estudio de la RSE en trabajos como [4, 15, 18, 32, 33].

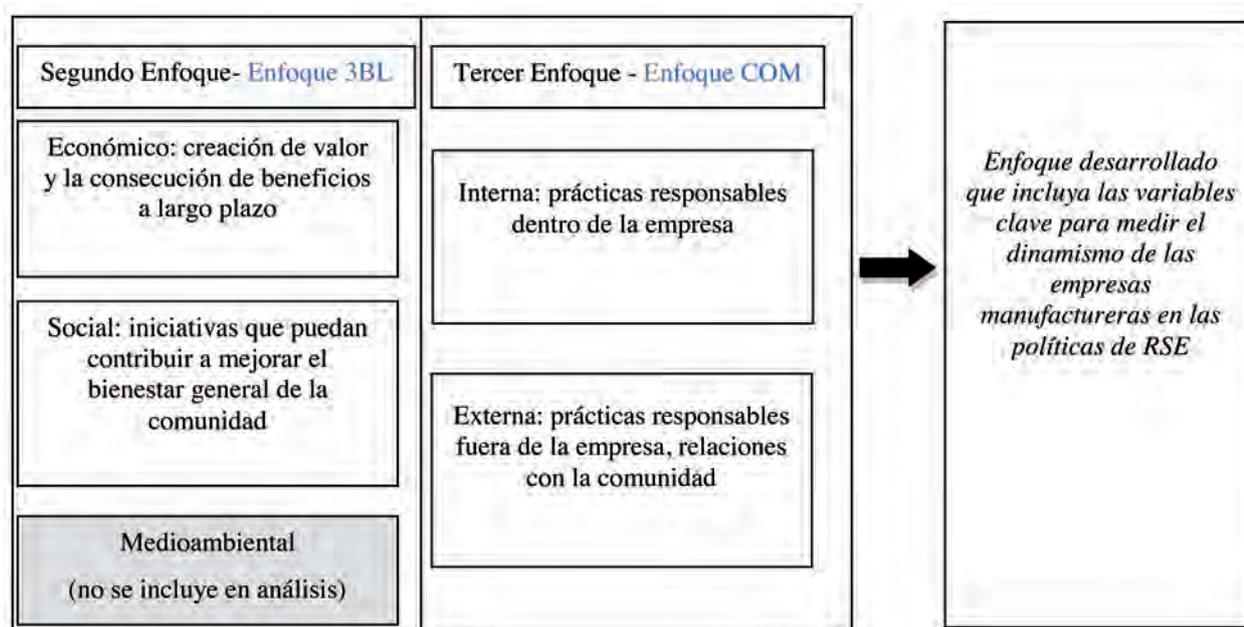


Fig. 1: Modelo propuesto de investigación

Dimensión	Clasificación	Variable de análisis	Definición	Nombre	Valores
Externa	Relaciones con la comunidad	Relaciones verticales	Cooperación con proveedores	R_PRO	0=no; 1=sí
			Cooperación con clientes	R_CLI	1=sí; 2=no
		Relaciones institucionales	Cooperación con universidades u otros centros de investigación	R_INS	1=sí; 2=no
		Relaciones horizontales	Cooperación con competidores.	R_COM	1=sí; 2=no
		Otras relaciones	Cooperación con otros agentes	R_OT	1=sí; 2=no
Interna	Empleados	Formación	Inversión en formación de sus empleados	FOR	0-5,728.000,00
	Calidad	Preocupación por la calidad	Si lleva a cabo controles de calidad y estandarización de procesos	CAL	1=sí; 2=no
	Innovación	Innovación en producto o proceso	Si ha realizado algún tipo de innovación de producto o proceso	INN	1=sí; 2=no
		Mejora en las relaciones con terceros	Si introdujo nuevos métodos de organización, relacionados con la gestión de las relaciones externas con otros agentes o instituciones	IEXT	1= No 2=Si
	Ámbito de actuación	Cobertura geográfica de la actividad de la empresa	Refleja el alcance geográfico del mercado principal en el que la empresa tiene su actividad.	COV	1=local 2=provincial 3=regional 4=nacional 5=exterior 6=interior y exterior
	Tamaño	El tamaño de la compañía medido por sus ventas.		VEN	35.160,00- 6,086.889.990,00
El tamaño de la compañía medido por el valor total de sus activos.		TA	6.747,00- 6,518.169.000,00		

Tabla 1: Variables para medir el dinamismo de la RSE en las empresas manufactureras

El análisis se ha efectuado primero utilizando estadísticas propias de la estadística descriptiva (los resultados se muestran en material adicional), lo cual permite comparar las características de la muestra. Posteriormente, se ha realizado un análisis factorial mediante componentes principales y rotación Varimax. El método de componentes principales (ACP) tiene como objetivo transformar (sin perder información) un conjunto de variables originales en otro nuevo, combinación lineal de las originales, denominadas componentes principales (factores). El ACP trata de hallar estos componentes o factores, los cuales se caracterizan por estar incorrelacionados entre sí, que sucesivamente expliquen la mayor parte de la varianza total. Con este tipo de análisis se pretende agrupar las principales variables del modelo de tal forma que podamos definir el dinamismo en RSE de las empresas manufactureras de forma más concreta y sencilla. Por otra parte, la rotación Varimax es la más utilizada, pues consigue que cada componente rotado presente correlaciones sólo con unas cuantas variables, y es adecuada cuando el número de componentes es reducido como ocurre en este trabajo.

Para verificar la conveniencia de la realización del análisis factorial, a partir de una matriz de datos se va a obtener la matriz de correlaciones con todas las variables propuestas, a través de la cual se puede observar el grado de las intercorrelaciones entre éstas. Uno de los requisitos que debe cumplir la matriz de datos es

que las variables independientes estén altamente correlacionadas, lo que permite suponer la existencia de una interdependencia entre ellas (el determinante de la matriz de correlaciones debe tener un valor muy bajo, sin ser igual a cero) [34].

A continuación, se ha sometido a las variables al test de esfericidad de Barlett [36]. Si las variables no están intercorrelacionadas, el test de esfericidad debe presentar un valor (significación) superior al límite 0,1 [36]; por lo tanto, se rechaza la hipótesis de que los indicadores no están relacionados y, en suma, la matriz de datos es válida para continuar con el proceso de análisis factorial. Finalmente, se considera el índice Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) [37], que compara las magnitudes de los coeficientes de correlación simple con las magnitudes de los coeficientes de correlación parcial. Siguiendo a [37], valores superiores a 0.6 indican que es adecuado utilizar el análisis factorial (ver Tabla 2).

Kaiser-Meyer-Olkin	0.775	
Test de especificidad Bartlett's	Chi-cuadrado aproximada	1,708.165
	Gl	66
	Sig.	0.000

Tabla 2: KMO y Test de Bartlett

Una vez observada la adecuación para la realización del análisis factorial exploratorio, se procede a llevar a cabo la siguiente fase que consiste en la extracción de componentes, a través de la agrupación de las 12 variables originales en unas nuevas (llamadas componentes o factores), las cuales son combinaciones de las originales. Para ello se ha utilizado el método de componentes principales y se ha optado por establecer una determinación a priori [36]. A partir de la revisión teórica realizada, se han identificado tres aspectos diferenciadores que conforman el sujeto de nuestra unidad de análisis:

1. Relaciones con grupos de interés externos.
2. Recursos internos.
3. Actividad y negocio.

3.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Uno de los principales problemas que se plantean en este análisis es la elección del número de factores, si bien, se trata de una decisión que debe adoptar el propio investigador. Siguiendo a [36], dicha decisión debe basarse en los siguientes criterios:

- a) Elegir aquellos factores que explican una mayor cantidad de varianza total. En este caso, son los 3 primeros los que explican la mayor parte de la varianza, en concreto el 59.35% de la misma. En ciencias sociales, siguiendo a [38] se considera satisfactorio si representa en torno al 60% de la varianza total.
- b) Seleccionar, según la regla de [37], aquellos factores cuyos auto-valores superen claramente la unidad. En este caso, los tres primeros la superan claramente, siendo el componente 4 y 5 prácticamente igual a uno.
- c) Observar la figura de sedimentación, la cual indicará el punto de inflexión de la gráfica. (En el material adicional se puede consultar el gráfico de sedimentación; muestra el punto de inflexión en el tercer factor, siendo aconsejable descartar los situados por debajo del mismo).

Así pues, elegimos los tres primeros componentes; si bien se pierde un 40% de la información original, sigue los márgenes aceptables para la extracción de componentes principales en este tipo de trabajos [4, 15, 36]. Los valores iniciales muestran que el modelo tiene una varianza explicada del 0,918. La Tabla 3, por su parte, muestra la matriz de componentes rotados.

Estas tablas muestran los resultados, los cuales evidencian la existencia de tres factores principales sobre los que las empresas pueden actuar de manera eficiente para modificar su dinamismo

en las actividades de RSE llevadas a cabo. Estos tres factores podrían definirse de la siguiente manera:

Factor 1: se incluye dentro de las dimensiones externa y social de la empresa. Son las relaciones y actuaciones que la empresa mantiene con la comunidad en la que realiza su actividad. Se observa que este factor es el que más peso tiene en las variables "relaciones verticales", "relaciones con las universidades y con otras instituciones o agentes externos". Se va a definir como "Relaciones con la comunidad" y explica por sí solo el 35% de la varianza.

Factor 2: se incluye en las dimensiones interna y económica de la empresa y determina el potencial de crecimiento y la capacidad de la empresa para poder poner en marcha nuevos proyectos. Se observa que es el que más importancia tiene en las variables "valor de los activos", "recursos financieros destinados a formación" y "cuantía de las ventas realizadas por la empresa". Este factor se va a denominar "Potencial de crecimiento" y explica el 15% de la varianza.

Factor 3: se incluye en la dimensión externa y la económica, relacionada con la creación de valor para la empresa mediante actividades de "desarrollo de nuevos productos" y "divulgación externa de las actividades". Este factor se va a denominar "Creación de valor" y explica el 8% de la varianza.

4. CONCLUSIONES

La industria manufacturera es uno de los sectores con mayor peso en el PIB de las economías de los países de nuestro entorno y, por lo tanto, debe asumir el compromiso de desempeñar un papel activo en el fomento del crecimiento sostenible y en la creación de empleo responsable. Hoy en día, las empresas del sector industrial se enfrentan a un entorno turbulento, lo que les exige emprender continuamente acciones que mejoren su competitividad pero, al mismo tiempo, es preciso que revisen sus actuaciones en cuestiones como políticas de recursos humanos, medioambientales, fiscales, entre otras, adoptando en todos estos aspectos un comportamiento responsable.

A partir de los enfoques teóricos expuestos, se ha planteado un modelo desarrollado y testado mediante la técnica del análisis factorial. Según los resultados obtenidos, se evidencia la existencia de tres factores principales sobre los que las empresas actúan de manera eficiente para lograr un comportamiento socialmente responsable: "Relaciones con la comunidad", "Potencial de crecimiento" y "Creación de valor".

Variable	Componente			Componentes rotados		
	1	2	3	1	2	3
TA	-0.595	0.638	0.045	-0.098	0.867	0.053
COV	-0.402	-0.340	0.579	-0.483	-0.036	0.615
R_CLI	0.705	0.310	0.047	0.753	-0.168	-0.007
R_COM	0.601	-0.240	-0.001	0.341	-0.549	-0.025
R_PRO	0.769	0.338	0.133	0.827	-0.183	0.074
R_INS	0.683	0.245	0.109	0.701	-0.208	0.058
R_OT	0.799	0.433	0.093	0.904	-0.124	0.028
FOR	-0.556	0.651	0.035	-0.060	0.854	0.040
I_EXT	0.383	-0.013	0.480	0.334	-0.237	0.457
VEN	-0.673	0.510	-0.020	-0.241	0.810	-0.003
CAL	0.510	0.246	-0.223	0.539	-0.103	-0.262
INN	-0.138	0.142	0.635	0.018	0.196	0.635
% de la varianza explicada por componente	-	-	-	35.47	15.02	8.85

Tabla 3: Matriz de componentes principales

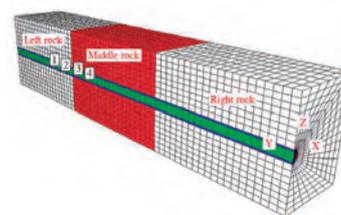
Los resultados obtenidos, coherentes con los modelos propuestos, muestran tres aspectos diferenciadores donde las variables económicas adquieren un valor importante para la industria manufacturera (tanto en su dimensión interna como externa), sin dejar de lado las relaciones con la comunidad. Así, del estudio realizado pueden derivarse implicaciones relevantes, tanto teóricas como prácticas. Desde la perspectiva teórica, esta investigación contribuye a comprender mejor cómo las empresas manufactureras entienden y asumen sus actuaciones en RSE. Desde el punto de vista de su aplicación práctica, este trabajo muestra cómo los directivos deben seguir promoviendo ciertas actitudes y comportamientos, que tengan en consideración los intereses de todas las partes con las que la empresa se relaciona, pues son precisamente las relaciones que establece la empresa con la comunidad, las que mayor incidencia tienen. De esta manera, se logrará un resultado positivo, no solo para la propia organización, sino también para sus stakeholders, y para la sociedad en general.

Este trabajo es un estudio exploratorio que ofrece ciertas limitaciones en la elección de la muestra y en la medición de variables (en ocasiones han sido variables proxy menos precisas de lo requerido). Estas limitaciones se intentarán sufragar en futuras investigaciones, en las cuales también se pretende plantear un modelo que permita contrastar qué variables de las propuestas tienen relación directa y significativa –positiva o negativa– con el dinamismo social de las empresas del sector manufacturero, así como la combinación con otras variables del ámbito medioambiental, de manera que complete este trabajo exploratorio. Estos trabajos, sin duda, contribuirán a que la industria desarrolle y amplíe su preocupación y responsabilidad, no sólo al ámbito medioambiental y cumplimiento de la normativa legal que impere en el país de referencia, sino también al ámbito social y económico, aspectos menos integrados y estudiados en este tipo de empresas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Herrera-Madueño J., Larrán-Jorge M., Lechuga-Sancho M.P., Martínez-Martínez, D. "Responsabilidad social en las Pymes: análisis exploratorio de factores explicativos". *Revista de Contabilidad*, 2016, Vol.19, nº1, p.31-44. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcsar.2014.10.003>.
- [2] Esteban P., Benito S. "CSR Policies: Effects on Labour Productivity in Spanish Micro and Small Manufacturing Companies". *Journal of Business Ethics*, 2015, Vol.128, nº4, p.705-724. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10551-013-1982-x>.
- [3] Charlo-Molina M.J., Moya-Clemente I., Muñoz-Rubio A.M. "Factores diferenciadores de las empresas del índice de responsabilidad español". *Cuadernos de Gestión*, 2013, Vol.13, nº2, p.15-37. DOI: <http://dx.doi.org/10.5295/cdg.110296mc>.
- [4] Dam L., Scholtens B. "Ownership concentration and CSR policy of European multinational enterprises". *Journal of Business Ethics*, 2013, Vol.118, nº1, p.117-126. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10551-012-1574-1>.
- [5] González-Ramos M.I., Donate M.J., Guadamillas F. "Propuesta de una escala para la medición de la responsabilidad social corporativa". *Pecvnia*, 2014, Vol.18, p.1-18.
- [6] Garriga E., Melé D. "Corporate social responsibility theories: Mapping the territory". *Journal of Business Ethics*, 2004, Vol.53, p.51-71.
- [7] Bowen H. *Social Responsibilities of the Businessman*. New York: Harper & Row, 1953. ISBN: 978-1-60938-206-3.
- [8] Carroll A.B. "Corporate social responsibility evolution of a definitional construct". *Business & Society*, 1999, Vol.38, nº3, p.268-295.
- [9] Comisión de las Comunidades Europeas. Libro Verde. Fomentar un Marco Europeo para la Responsabilidad Social de las Empresas, COM(2001), 366 final, 18.7.2001. Bruselas. Disponible en: <http://eur-lex.europa.eu>.
- [10] Barnea A., Rubin A. "Corporate social responsibility as a conflict between shareholders". *Journal of Business Ethics*, 2010, Vol.97, nº1, p.71-86. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10551-010-0496-z>.
- [11] Wartick S.L., Cochran P.L. "The evolution of the corporate social performance model". *Academy of Management Review*, 1985, Vol.10, nº4, p.758-769.
- [12] Wood D.J. "Corporate social performance revisited". *Academy of Management Review*, 1991, Vol.16, nº4, p.691-718.
- [13] Hilliard I. "Responsible management, incentive systems and productivity". *Journal of Business Ethics*, 2013, Vol.118, nº2, p.365-377. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10551-012-1570-5>.
- [14] Alvarado A., Schlesinger M. W. "Dimensionalidad de la responsabilidad social empresarial percibida y sus efectos sobre la imagen y la reputación: una aproximación desde el modelo de Carroll". *Estudios Gerenciales*, 2008, Vol.24, nº108, p.37-59.
- [15] Iturrioz C.I., Aragón C., Narvaza L. "Un análisis multidimensional de la heterogeneidad de la responsabilidad social en la pequeña y mediana empresa". *Revista Europea de Dirección y Economía de la Empresa*, 2011, Vol.20, nº4, p.117-137.
- [16] Carroll A.B. "The pyramid of corporate social responsibility: Toward the moral management of organizational stakeholders". *Business Horizons*, 1991, Vol.34, p.39-48.
- [17] Schwartz M.S., Carroll A.B. "Corporate social responsibility: A three-domain approach". *Business Ethics Quarterly*, 2003, Vol.13, nº04, p.503-530. DOI: <http://dx.doi.org/10.5840/beq200313435>.
- [18] Elkington J. *Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business*. Oxford: Capstone, 1997. ISBN: 978-18-411-2084-3.
- [19] Martínez-León I.M., Arcas N., García M. "La influencia de género sobre la responsabilidad social empresarial en las entidades de economía social". *REVESCO. Revista de Estudios Cooperativos*, 2011, Vol.105, p.143-172. DOI: http://dx.doi.org/10.5209/rev_REVE.2011.v105.6.
- [20] Server R.J., Villalonga I. "La Responsabilidad Social Corporativa (RSC) y su gestión integrada". *CIRIEC-España, Revista de Economía Pública, Social y Cooperativa*, 2005, Vol.53, p.137-161.
- [21] Santos M. "CSR in SMEs: Strategies, practices, motivations and obstacles". *Social Responsibility Journal*, 2011, Vol.7, nº3, p.490-508. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/17471111111154581>.
- [22] Deakin S., Hobbs R. "False dawn for CSR? Shifts in regulatory policy and the response of the corporate and financial sectors in Britain". *Corporate Governance: An International Review*, 2007, Vol.15, nº1, p.68-76. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8683.2007.00543.x>.
- [23] Chapple W., Morrison Paul C.J., Harris R. "Manufacturing and corporate environmental responsibility: Cost implications of voluntary waste minimization". *Structural Change and Economic Dynamics*, 2005, Vol.16, p.347-373. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.strueco.2004.04.003>.
- [24] Murillo-Luna J.L., Garcés-Ayerbe C., Rivera-Torres P. "Aspectos inhibidores de la proactividad medioambiental en las empresas industriales: un análisis empírico". *Cuadernos de Gestión*, 2006, Vol.6, nº2, p.45-58.
- [25] Williamson D., et al. "Drivers of environmental behavior in manufacturing SMEs and the implications for CSR". *Journal of Business Ethics*, 2006, Vol.67, nº3, p.317-330. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10551-006-9187-1>.
- [26] Wagner M. "How to reconcile environmental and economic performance to improve corporate sustainability: corporate environmental strategies in the European paper industry". *Journal of Environmental Management*, 2005, Vol.76, p.105-118. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.11.021>.
- [27] Frynas J.G. "The false developmental promise of Corporate Social Responsibility: evidence from multinational oil companies". *International Affairs* 2005, Vol.81, nº3, p.581-598. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1468-2346.2005.00470.x>.
- [27] Cegarra-Leiva D., Sánchez-Vidal, M. E., Cegarra-Navarro, J. G., Arizkuren-Eleta, A., & Martínez-Caro, E. "Cómo afecta la conciliación laboral y personal en la innovación de la pyme industrial. Estudio en el sector del metal de la región de Murcia". *DYNA Management*, 2013, Vol.1, nº1, p.1-11. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/MN5682>
- [29] Hair J., Anderson R., Tatham R., Black W. *Multivariate data analysis: with readings*. (5th Ed.). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1998.
- [30] Peng C., Lee K. "Ingersoll G. An introduction to logistic regression analysis and reporting". *Journal of Educational Research*, 2002, Vol.96, p.3-14. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00220670209598786>.
- [31] Conway J.M., Huffcutt A.I. "A review and evaluation of exploratory factor analysis practices in organizational research". *Organizational Research Methods*, 2003, Vol.6, nº2, p.147-168. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/1094428103251541>.
- [32] Niehm L.S., Swinney J., Miller N.J. "Community social responsibility and its consequences for family business performance". *Journal of Small Business Management*, 2008, Vol.46, nº3, p.331-350. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1540-627X.2008.00247.x>.
- [33] Larrán M., Herrera J., Martínez D. "Relación entre la RSE y el performance competitivo en la pequeña y mediana empresa: Un estudio empírico". *AECA: Revista de la Asociación Española de Contabilidad y Administración de Empresas*, 2013, Vol.104, p.9-12.
- [34] Montoya O. "Aplicación del análisis factorial a la investigación de mercados. Caso de estudio". *Scientia et Technica*, 2007, Vol.3, nº35, p.281-286.
- [35] Bartlett M.S. "Tests of significance in factor analysis". *British Journal of Statistical Psychology*, 1950, Vol.3, nº2, p.77-85. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.2044-8317.1950.tb00285.x>.
- [36] Riquel F., Vargas A.V. "El entorno institucional de carácter medioambiental de los campos de golf andaluces: un análisis factorial". *Cuadernos de turismo*, 2012, Vol.29, p.209-229.
- [37] Kaiser H.F. "A second generation little jiffy". *Psychometrika*, 1970, 35(4), 401-415. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02291817>.
- [38] Hair J.F., Anderson R.E., Tatham R.L., Black W.C. *Análisis Multivariante*. Madrid: Pearson, 2004. ISBN: 978-84-832-2035-1.

Mechanical behavior of fully-grouted bolt in jointed rocks subjected to double shear tests



Comportamiento de un anclaje totalmente embutido en rocas adyacentes, sometido a ensayos de doble cortadura (cizallado)



Shuren Wang^{1,2*}, Huaiguang Xiao², Paul Hagan³, and Zhengsheng Zou^{1,2}

¹ International Joint Research Laboratory of Henan Province for Underground Space Development and Disaster Prevention, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China

² Opening Laboratory for Deep Mine Construction, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China

³ School of Mining Engineering, The University of New South Wales, Sydney 2052, NSW, Australia

* Corresponding author, e-mail: w_sr88@163.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8325> | Recibido: 27/02/2017 • Evaluado: 27/01/2017 • Aceptado: 28/03/2017

RESUMEN

• Para analizar los resultados de un anclaje completamente embutido en rocas unidas se efectuaron ensayos de doble cizallado y se llevó a cabo la deducción analítica de la relación entre la fuerza axial, la fuerza de cizallado y el desplazamiento de cizallado del anclaje completamente embutido usando el modelo mecánico simplificado. Finalmente se analizaron las sensibilidades de los parámetros influyentes del anclaje. Los resultados muestran que la fuerza de cizallado predomina en el ensayo de cizallado que la fuerza de cizallado es mucho mayor que la fuerza axial. La fuerza de cizallado del anclaje completamente embutido aumenta cuando el incremento del desplazamiento del cizallado aumenta y la curva que relaciona la fuerza de cizallado y el desplazamiento de cizallado puede ser simplificada a cinco pasos: fuerte aumento, ligera disminución, suave aumento, suave disminución y muy fuerte disminución. Del mismo modo, las curvas de fuerza axial y de desplazamiento por cizallado pueden ser simplificadas a tres pasos: aumento estable, mantenimiento y fuerte disminución. Los resultados de la simulación muestran que el límite de tensión de la resistencia a cizalla del anclaje es el factor más significativo, la resistencia de las rocas unidas es el segundo y los parámetros de la superficie unida tienen el último efecto. Las conclusiones obtenidas en el estudio son de un valor teórico importante para la práctica de ingeniería similar.

• **Palabras clave:** Ensayo de doble cizallado, Anclaje completamente embutido, Fuerza axial, Fuerza de cizallado, Simulación numérica.

ABSTRACT

To analyze shear performances of the fully-grouted bolt in jointed rocks, the double shear tests were conducted, and the analytical derivation to the relationship among axial force, shear force and shear displacement of the fully-grouted bolt were carried out by using the simplified mechanical model. And the sensitivities of the influence parameters of the bolt were analyzed. The results show that the shear force predominates in the shear test and which is much greater than the axial force. The shear force of the fully-grouted bolt increases with the shear displacement increasing and the relationship curve of shear force and shear displacement can be simplified into five stages: steep increase, slight decline, slow increase, slow decline and sharp decline stages. Similarly, the axial force and shear displacement curve can be divided into three stages: stable increase, steady and sharp decline

stages. The simulation results show that the confining pressure on the shear strength of the bolt is the most significant factor, the strength of the jointed rock is the second, and the jointed surface parameters show the least effect. The conclusions obtained in the study are of important theoretical value to direct the similar engineering practice.

Keywords: Double shear test, Fully-grouted bolt, Axial force, Shear force, Numerical simulation.

1. INTRODUCTION

For anchoring the fractured rock mass, the axial force and shear force of the bolt are not alone. The bolt not only can provide the strong tensile strength, but also can effectively prevent the separation of the rock mass when the jointed rock mass is strengthened by the fully-grouted bolt. The transverse shear behavior of the bolt often contributes greatly to the reinforcement effect of the rock mass. Many scholars focus too much on the axial force not considering the role of the shear force in valuating the bolt performance, so the current anchoring mechanism is far behind the engineering practice, which directly affects the rational application and development of the anchoring technology [1-3].

Since the existence of joints in the rock mass, the strength of the rock mass is often reduced and the jointed rocks are easy to move along the direction of the parallel or vertical to the joint face. The fully-grouted bolt in jointed rocks as an important support technology can effectively control the deformation and relative slippage of the jointed rocks. In many cases, the joint surface is not perpendicular to the axis direction of the bolt, so the bolt will be subjected to shear and tensile loading due to the rock moving along the plane of the jointed rocks [4-5]. Thus, it is necessary to evaluate the mechanical behavior of the fully-grouted bolt under shear and tensile loading conditions.

Due to the deformation of the rock mass is often controlled by the joints in the rock mass, the main motion of the rock is usual the shear displacement between the blocks, which leads to the supported bolts displaying the shear bend, cut, twist and pull off phenomenon. To analyze shear performances of the fully-grouted bolt in jointed rocks, this paper adopt the comprehension methods such as laboratory test, numerical simulation and theoretical analysis to research on the mechanical behaviors of the fully-grouted bolt in the jointed rocks subjected to double shear tests.

2. STATE OF THE ART

In recent years, research has confirmed that shear performance can be just as significant as tensile. So some scholars have conducted the analytical analysis of the shear force and the shear displacement, such as X.R. Ge and J.W. Liu analyzed the influence of rockbolt on the joint plane and reckoned formulas of the shear strength of the joint plane by laboratory tests and theoretical analysis [6]. K. Spang and P. Egger investigated the main parameters of rockbolt influence on joint plane and deduced formulas for the evaluation of the bearing capacity of the fully grouted bolts and for prediction of the required shear displacements [7]. Y.L. Wu et al. studied the interaction mechanism between the rockbolt and the jointed rock masses and analyzed the rockbolt influence on the stress intensity factor on the crack tip under tensile and shear forces by using linear elastic fracture mechanics [8]. S.L. Yang et al. proposed exponential function and parabolic function to describe the lateral shear stress of rockbolt and deduced the relationship between the shear force and the transverse displacement [9]. G. Grasselli simulated the shear tests of the jointed rock masses by a finite element model to reveal different deformations and shear forces of the full grouted bolt and the swelled bolt [10]. H. Jalai-far and N. Aziz pointed that bending behaviors of the bolt were divided into elastic and plastic phases under double shear tests with confining pressure, and he analyzed the influences on the joint plane position of plastic hinge, concrete strength, axial force and diameter of the bolt [11]. W. Zhang and Q.S. Liu established the deformation model under shear load and introduced length variable of extrusion failure to deduce the functional relations of shear-load versus shear displacement and axial-load versus axial displacement respectively [12]. F.L. Wang et al. studied the fully grouted bolt to support the bedding slope and established the linear functional relations between the shear effect of the bolt and the axial force of the bolt [13]. Other scholars have done many physical tests and numerical simulations in order to study the mechanical behavior of the rock bolt in resisting the shear force. Such as W. Wei et al. built the beam element model of the bolt near joint plane and developed the manifold simulated method base on the bolt model and the basic principle of numerical manifold [14]. Y. Chen conducted the optimized analysis of the influence factors on the jointed plane by laboratory tests for different setting angles, different block materials, and different joint displacements [15]. L. Li et al. simulated the relationships between shear force and shear displacement with different bolt setting angles, different rock strengths and different bolt diameters [16]. L.P. Srivastava and M. Singh stated that the rockbolt could increase strength of

joint plane by large scale shear tests with non-confining and confining pressure [17], and the related research works [18–20], etc.

To sum up the above mentioned literatures, we found that many important results had been achieved about supporting parameters and mechanical behaviors of the rock bolt. However, it was not perfect enough about stress and deformation analysis of the bolt in the jointed rocks under double shear tests. So this paper would conduct further study to analyze the performances of the fully-grouted bolt in jointed rocks subjected to double shear tests. The remainder of this study was organized as follows. In Section 3, the comprehensive research methods, such as laboratory test, numerical simulation and theoretical analysis were introduced. In Section 4, the mechanical behaviors of the fully-grouted bolt under double shear tests were analyzed. Finally, some conclusions were given in Section 5.

3. METHODOLOGY

3.1. LABORATORY TEST

The double shear tests were conducted in the laboratory at School of Mining Engineering, The University of New South Wales, Australia.

3.1.1. Materials and specimens

As shown in Fig. 1(a), the basic materials included three concrete blocks to simulate the jointed rocks, cement covering the bolt to simulate the grout, and HRB steel bar to simulate the rock bolt. The steel plates located two lateral sides to distribute the axial loading stress evenly. The size of each block was 300 mm long, 300 mm wide and 200 mm high. The diameter of the steel bar was 16 mm, the diameter of the hole for the filled grout was 24 mm, and the thickness of the bottom steel plate was 20 mm.

3.1.2. Loading equipment and procedure requirements

As shown in Fig. 1(b), the capacity of the universal testing machine was 3600 kN, which was used to apply a vertical loading on the middle steel plate of the three ones located at the bottom of the test model from down to up. These FLA-3-11-3L resistance strain gauges were used to monitor the axial deformation of the grouted bolt and the strain gauge had a nominal resistance of 120 Ω and gauge factor of $2.12 \pm 1\%$. The force sensor located at the right side of the model and the liner displacement sensor (LVDT) in a fixed way were used to measure the axial force and shear displacement of the bolt, respectively.

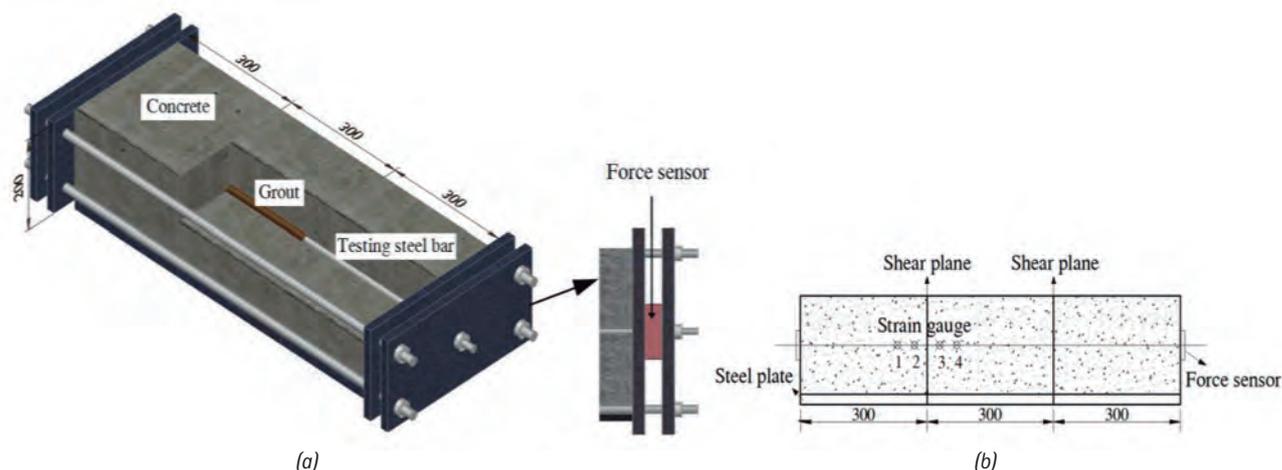


Fig. 1: The three-dimensional model and monitoring sensors of the model. (a) The three-dimensional model under double shear tests; (b) Loading direction and monitoring sensors of the model

As shown in Fig. 1(b), the strain gauges were set on the sides of the bolt (top and bottom), which were distanced from the jointed plane -70 mm, -30 mm, 30 mm, and 70 mm respectively. These positions of the strain gauges were marked by number 1 to 4. Due to the surface of the steel bar was not smooth enough, these positions of the strain gauges of the bolt were polished before setting strain gauges to ensure the measured data accurately. For maximizing the axial strain profiles, the strain gauges installed in the sample were aligned perpendicular to the shear load direction. This allowed analysis of the strains occurring on opposite sides of the rock bolt with expected zones of tension and compression.

In order to ensure all the three blocks bear stress evenly, three steel plates with 20 mm thickness were set up the downside of the three ones [16]. The left-end and right-end of the test model were fixed fully by the lock nuts, and the up and down directions of the middle block of the three ones were free. The universal machine could apply the vertical loading at the bottom of the middle block. When the applying load exceeded the maximum value of the capacity of the bolt, the test must stop.

The process of conducting such a test: Firstly, casting concrete blocks are needed before the test. Secondly, as shown in Fig. 1(a), three blocks are set on the bottom steel plate and the bolt with the strain gauges is set through these holes of three blocks. Thirdly, after the lateral steel plates and force sensors being set up, the left-end and right-end of the test model were fixed fully by the lock nuts. Fourthly, the model is moved to the universal testing machine and then can apply the vertical force up on the middle block to conduct the double shear test.

3.2. SIMPLIFIED MECHANICAL MODEL AND DERIVING FORMULAS

3.2.1. Engineering model

When the middle rock was applied the vertical up loading, the extruding force of the bolt appeared from the jointed plane. For the deformation development of the bolt firstly entered the small deformation and then failed to the large deformation phases, so the mechanical model would be divided into two phases: the elastic (small deformation) and the plastic (large deformation) phases.

To make the problem simpler, the simplified mechanical model was shown in Fig. 2(a), according to A.M. Ferrero's research results, the extruding force of the bolt presented the triangular distributing load [21]. But according to the views of Y.T. Liang, et al., when the deformation of the bolt was in the plastic stage, the extruding force of the bolt displayed a constant distributing load (Fig. 2(b)) [22].

3.2.2. Simplified mechanical model

Due to the extruding force of the bolt displayed the triangular distributing load in the elastic phase, the intersection point between the shear plane and the bolt was positioned *O* at the

bolt. The deformation of the point *O* was zero, because the two sides of the shear plane were in pressure and tension zones respectively. According to stress analysis of the beam, the moment of point *O* was zero, so the point *O* just presented axial-force and shear-force. The moment of point *C* showed the maximum value and shear-force was zero, so the point *C* was the plastic hinge and point *C* could be simplified the fixed bearing, as shown in Fig. 3(a)(See section: supplementary material). Because the simplified model showed geometrical and mechanical symmetry, it could be simplified the statically determinate structure of a cantilever beam, as shown in Fig. 3(b) (See section: supplementary material).

As shown in Fig. 4(a) (See section: supplementary material), in the same way, when the mechanical model of the bolt was in the plastic phase, the simplified model could be simplified the statically determinate structure of a cantilever beam, as shown in Fig. 4(b) (See section: supplementary material).

3.2.3. Deriving the formulas for mechanical analysis

In the elastic phase, as shown in Fig. 3(b) (See section: supplementary material), according to the simplified mechanical model, we can write the following equations:

$$\begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta_{1q} \\ \Delta_{2q} \\ \Delta_{3q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Where δ_{ij} was the displacement by unit force; X_1 , X_2 and X_3 was axial-force, shear-force and moment of point *O*, respectively. Δ_1 , Δ_2 , and Δ_3 was axial displacement, deflection, and rotation angle of point *O*, respectively. Δ_{1q} , Δ_{2q} and Δ_{3q} was axial displacement, deflection and rotation angle of point *O* under the triangular distributed load, respectively.

According to the force method in structural mechanics, equations 2 and 3 can be obtained as follows:

$$\begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{l_0}{EA} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{l_0^3}{3EI} + \frac{kl_0}{GA} & \frac{l_0^2}{2EI} \\ 0 & \frac{l_0^2}{2EI} & \frac{l_0}{EI} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\Delta_q = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{q_0 l_0^4}{12EI} + \frac{kq l_0^2}{GA} \\ \frac{q_0 l_0^3}{9EI} \end{bmatrix} \quad (3)$$

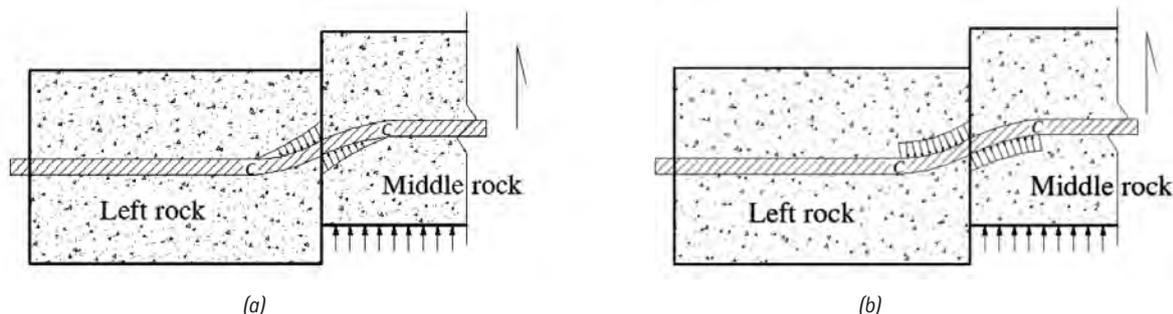


Fig. 2: The different stress states of the bolt under double shear tests. (a) Elastic phase; (b) Plastic phase

Where l_0 was the stress length of the bolt. E was young modulus of the bolt. G was shear modulus of the bolt. I was the cross sectional moment of inertia of the bolt. A was the cross sectional area of the bolt. k was a concentration coefficient of the shear stress distribution.

Because the moment of point O is zero, and the deformation compatibility conditions were described as equation 4.

$$\begin{cases} \Delta_1 = u \sin \alpha \\ \Delta_2 = u \\ \Delta_3 = \alpha l \end{cases} \quad (4)$$

Where u was the loading displacement along the vertical direction and α was rotation angle of the bolt.

The axial-force of point O was written as equation 5.

$$X_1 = \frac{EA}{l_0} \Delta_1 \quad (5)$$

From equation 3, we can obtain the shear-force of point O and linear load as equations 6, 7, and 8.

$$X_2 = \frac{(18EIGAl_0^2 + 72kE^2I^2)\Delta_3 - 24EIGAl_0\Delta_2}{12EIkI_0^2 + GAl_0^4} \quad (6)$$

$$q_0 = \frac{-(216kE^2I^2 + 72EIGAl_0^2)\Delta_3 + 108EIGAl_0\Delta_2}{12kEI_0^3 + GAl_0^5} \quad (7)$$

$$X_2 = \frac{q_0 l_0}{2} \quad (8)$$

From equations 6 to 8, the relationship between Δ_2 and Δ_3 is written as equation 9.

$$\Delta_3 = \frac{13GAl_0}{30kEI + 9GAl_0^2} \Delta_2 \quad (9)$$

From equations 6 and 9, the shear-force of point O is written as equation 10.

$$X_2 = \frac{72kGAE^2I^2 + 6G^2A^2EI_0^2}{(12EIkI_0 + GAl_0^4)(3GAl_0^2 + 10kEI)} \Delta_2 \quad (10)$$

Then the axial-force of end of the bolt was

$$N_0 = X_1 \cos \alpha \quad (11)$$

Similarly, in the plastic phase, as shown in Fig. 4(b) (See section: supplementary material), according to the simplified mechanical model, the analytical process was the same as that of the elastic phase.

The axial-force of point O is

$$X_1 = \frac{EA}{l_0} \Delta_1 \quad (12)$$

The axial-force of end of the bolt is the same as equation 11. The shear-force of point O is

$$X_2 = \frac{576kGAE^2I^2 + 24G^2A^2EI_0^2}{(24EIkI_0 + GAl_0^4)(11GAl_0^2 + 40kEI)} \Delta_2 \quad (13)$$

3.3. BUILDING THE COMPUTATIONAL MODEL AND PROCEDURES

3.3.1 The computational model

According to the test model in the laboratory (Fig. 1), the computational model was built by using FLAC3D as shown in Fig. 5. Due to the geometrical symmetry of the test model, the computational model was simplified a half of the test model to improve the computational efficiency. There were three radcylinder models to simulate the three blocks in the test model, and the size of each radcylinder model was 300 mm long, 300 mm wide, and 200 mm high. The diameter of the bolt was 16 mm and a cshell model was 4 mm thickness to simulate the grout. There were three interfaces being embedded by rock to rock, rock to grout and grout to bolt to simulate the real interfaces.

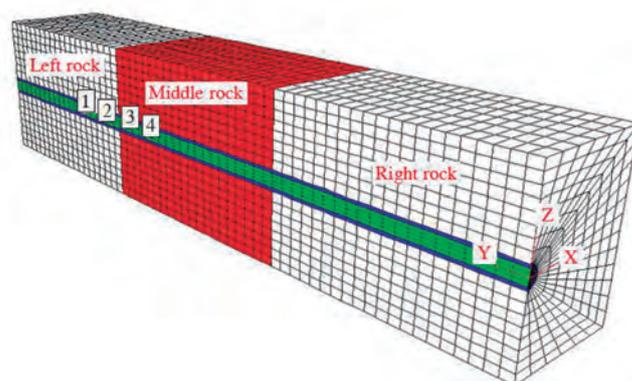


Fig. 5: The computational model and its meshes

3.3.2. Computational parameters and procedure requirements

The two lateral sides of the model were fixed fully in y - and x -axis directions respectively. The upper and the lower sides of the middle block were free while the other blocks were fixed at the two sides in z -axis direction.

Supposing the three blocks, the grout and the interfaces were followed Mohr-Coulomb's yield criterion. However, the bolt was regarded as a linear elastic body. The mechanical parameters of the model were listed in Tables 1 and 2.

Name	Bulk modulus (GPa)	Shear modulus (GPa)	Cohesion (MPa)	Friction angle (°)	Tension (MPa)
Rock	15.6	12.7	11	43	5
Grout	6.9	5.6	12	30	6
Bolt	77	43			

Table 1 The mechanical parameters of the model

During the computation, the middle rock was continuously applied the evenly distributed load. The bending displacements of the bolt were monitored at positions distanced from the joint plane were -70 mm, -30 mm, 30 mm, and 70 mm. The test did

Name	Normal stiffness (GPa/m)	Shear stiffness (GPa/m)	Cohesion (MPa)	Friction angle (°)
Rock-rock	2000	2000	0.1	20
Rock-grout	10000	10000	1.0	30
Grout-bolt	70000	70000	10	32

Table 2 The mechanical parameters of the interfaces

not stop until the bending displacements of the bolt without increasing.

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. PERFORMANCES OF THE BOLT BASED ON THE TEST

As shown in Table 3, the tops of the bolt at position 1 and 2 being set ± 30 mm on distance from the shear plane displayed pressure stress. While the tops of the bolt at position 3 and 4 being set ± 70 mm on distance from the shear plane displayed tensile stress. In contrast, the stresses of the opposite side of these positions of the bolt showed the opposite stress state, but the deflection of the same position displayed nearly the same value.

Number of strain gauge	Deflection (mm)	Strain (10^{-3})	Distance from shear plane (mm)
1- Bottom	4.27	2.601 (+)	-70
1- Top	4.27	2.564 (-)	-70
2- Bottom	4.29	5.965 (+)	-30
2- Top	4.29	5.843 (-)	-30
3- Bottom	13.27	5.620 (-)	+30
3- Top	13.27	5.790 (+)	+30
4- Bottom	23.05	4.651 (-)	+70
4- Top	23.05	4.819 (+)	+70

Table 3 The measured strain and deflection of the bolt [16]

It can be seen from Fig. 6(a), at the elastic phase with initial loading, the shear-force increased dramatically while the shear displacement increased slowly. As the loading reached the elastic limit, the shear-force declined slightly before plastic stage. With

the continuous loading, the deformation of the bolt was in the plastic stage, the shear-force increased slowly while the shear displacement increased largely. At last, the curve of shear-force and shear displacement displayed a dramatic decrease, as the rock was split suddenly with no stress force and this stage showed a sharp drop stage. In general, the shear-force of the fully-grouted bolt increased with the shear displacement increasing and the relationship curve of shear-force and shear displacement can be simplified into five stages: steep increase, slight increase, slow increase, slow increase and sharp decline stages.

As seen from Fig. 6(b), when the middle block was applied the load by slowly lifting straight up, the bolt was restricted by both ends of the fixed steel plates and the axial-force of the bolt appeared. At first, with the shear displacement increasing, the axial force increased evenly. Then the axial force kept steadily with the shear displacement increasing. At last, the block was split, and the axial-force disappeared suddenly, so the curve of the axial force and shear displacement declined dramatically. Overall, the axial force of the fully-grouted bolt increased with the shear displacement increasing and this relationship curve of axial force and shear displacement can be simplified into three stages: stable increase, steady and sharp decline stages.

From the relationship curve of the shear force and the axial force (Fig. 7) (See section: supplementary material), without considering the initial loading fluctuation, we found that the shear force increased linearly with the axial force increasing. As shown in Fig. 8 (See section: supplementary material), it can be given a relationship curve between the bending displacement of the bolt and the positions distanced from the shear plane base the monitored data by LVDT. This curve described the upside of the bolt in left block was in the compression zone and that in the middle block was in the tension zone.

4.2. ANALYTICAL SOLUTIONS FOR BEHAVIORS OF THE BOLT

According the test data ($E=200$ GPa, $G=76.9$ GPa, $l_0=0.30$ m, $I=3.21 \times 10^{-9}$ m⁴, $A=2 \times 10^{-4}$ m², $k=10/9$), putting these parameters into formulas 10, 11, and 13, and then we can obtain the relationship of axial force, shear force and shear displacement in the elastic and plastic phases, respectively.

As shown in Fig. 9(a) (See section: supplementary material), it presented a similar trend between the analytical and test results. The axial force versus shear displacement curve displayed a straight line, because the variation of axial force is the same

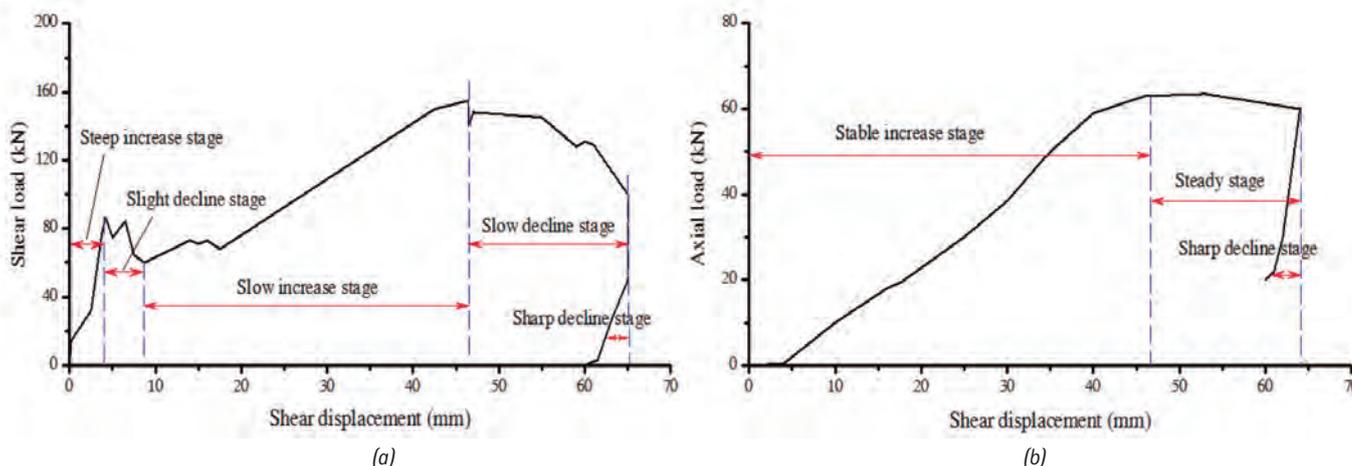


Fig. 6: The curves of shear force and axial force versus shear displacement under double shear tests. (a) The curve of shear force and shear displacement; (b) The curve of axial force and shear displacement

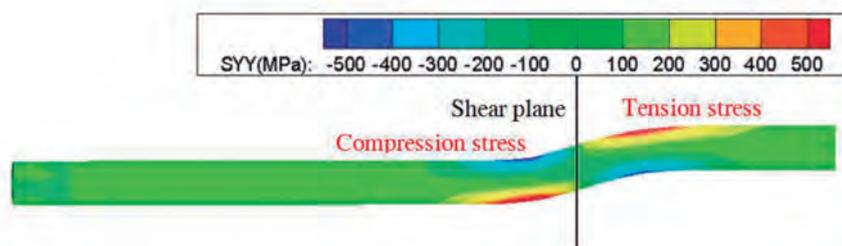


Fig. 11: The mechanical states of the bolt in the shear tests

in both the elastic and the plastic phases. In the cantilever beam model, it does not show the split phenomenon of the rock, so the analytical results do not appear the sharp decline trend. As shown in Fig. 9(b) (See section: supplementary material), the slope of the shear force is large in the elastic phase while that is small in the plastic phase in the analytical results, so the analytical curve presented the polyline segments. Similarly, the analytical results do not appear the sharp decline trend due to the non-split of rock in the analytical model.

4.3. NUMERICAL ANALYSIS OF PERFORMANCES OF THE BOLT

It can be seen from the displacement vectors field of the model (Fig. 10, see section: supplementary material), the middle rock displayed the vertical upward movement and the bolt showed both the vertical displacement and the axial displacement, which indicated that the bolt was subjected to shear stress and axial stress. As shown in Fig. 11, the upper part of the bolt on the left side nearby the shear plane displayed the compression stress, but that on the right side showed the tension stress. The lower parts of the bolt showed the opposite characteristics. The stress characteristics of the bolt were consistent with that in the physical test. As shown in Fig. 12 (See section: supplementary material), the bending displacement of the bolt in the numerical calculating was well consistent with that in the laboratory test in Table 3.

As shown in Fig. 13 (See section: supplementary material), the bending displacements of the bolt decreased with these parameters increasing, such as cohesion, friction and stiffness of rock-rock interface. As shown in Fig. 14 (See section: supplementary material), when $S_{zz}=5.0$ MPa and $S_{xx}=5.0$ MPa, the bending displacement of the bolt decreased significantly with the confining pressure of y-axis direction increasing. The results showed that the resistance ability of the shear plane increased with confining pressure increasing.

As the rock split under shear double tests due to scale effect, the bolt would not be in the pure shear stress state completely. However, this phenomenon can be reduced by increasing the scale of the test model. In this paper, only the stress state of the bolt under pure shear condition was taken into account. But in the practical engineering, the combination of shear and tension stress are combined. So in the next step, the combined stress states of the bolt along the joint surface will be further studied.

Because the loading process of the test was not completely in the static state, the force-displacement relationship displayed obviously curved characteristic, showing the dynamic loading characteristics. While the simplified analytical model was a static model, so the results showed a strong linear characteristics, but the relationship of force-displacement can have a good effect for the engineering design and construction.

Since the geological conditions are usually more complex, the fully-grouted bolt not only plays a role in resistance to tension,

but also plays a role in shear. According to the rock strength, confining pressure and the parameters of the jointed plane, it is very important to choose optimized angles of the fully-grouted bolt to ensure the engineering safety.

5. CONCLUSIONS

To analyze the performances of the fully-grouted bolt in the jointed rocks subjected to the double shear tests, the comprehension methods such as laboratory test, numerical simulation and theoretical analysis were adopted. We obtained the conclusions as follows:

- (1) Through the double shear tests of the bolt in the jointed rocks, we found that the shear force predominated in the shear test and the shear force was much greater than the axial force. The stress of the bolt on both sides of the jointed plane presented the opposite state, and the curve of shear force with shear displacement increasing displayed five stages: steep increase, slight decline, slow increase, slow decline and sharp decline stages. Similarly, the axial force and shear displacement curve can be simplified into three stages: stable increase, steady and sharp decline stages.
- (2) Based on the results of laboratory tests, we found that the shear force increase linearly with the axial force increasing, and the elasto-plastic characteristics of the fully-grouted bolt under double shear tests were verified by the simplified analytical model. Moreover, the simulation results show that the confining pressure on the shear force of the bolt is the most significant factor, the strength of the jointed rock is the second, and the jointed surface parameters show the least effect.

It is not appropriate to focus too much on the axial force not considering the role of the shear force in valuating the bolt performance. The conclusions can greatly promote the sheared bolts application in anchoring the fractured rock mass. However, with the development of practice, the further studies are needed to consider the complicated conditions and more influencing factors to the shear force of the fully-grouted bolts.

BIBLIOGRAPHY

- [1] Martin LB, Tijani M, Hadj-Hassen F. "A new analytical solution to the mechanical behaviour of fully grouted rockbolts subject to pull-out tests". Construction and Building Materials. February 2011. Vol. 25-2. P. 749-755. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.011>
- [2] Wang SR, Xiao HG, Cao C, Zou ZS, Liu XL. "Simulation verification analysis of anchoring characteristics of transverse rib steel bar during pull-out test". DYNA. September 2016, Vol. 91-5. p. 548-553. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8077>
- [3] Chen JH, Saydam S, Hagan PC. "An analytical model of the load transfer behavior of fully grouted cable bolts". Construction and Building Materials. December 2015, Vol. 101-1. p. 1006-1015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.099>
- [4] Liu QS, Lei GF, Peng XX. "Advance and review on the anchoring mechanism in deep fractured rock mass". Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. February 2016. Vol. 35-2. p. 312-332. DOI: <http://dx.doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2015.0203>
- [5] Chen WQ, Jia ZX, Zhao YF, Liu LP, Zhou JJ, Lin XC. "Analysis of axial and transverse effects of rock bolt during shearing process". Rock and Soil Mechanics. January 2015. Vol. 36-1. p. 143-148. DOI: <http://dx.doi.org/>

org/10.16285/j.rsm.2015.01.020

- [6] Ge XR, Liu JW. "Study on the shear resistance behavior of bolted rock joint". Chinese Journal of Geotechnical Engineering. February 1988. Vol. 10-1. p. 8-19.
- [7] Spang K, Egger P. "Action of fully-grouted bolts in jointed rock and factors of influence". Rock Mechanics and Rock Engineering. July-September 1990. Vol. 23-3. p. 201-229.
- [8] Wu YL, Wang YH, Xu MG. "Effect of bolt in jointed rock mass under mixed loading of tension and shearing". Chinese Rock Mechanics and Engineering. May 2003, Vol. 22-5. p. 769-772.
- [9] Yang SL, Xu WY, Huang QP. "Analysis on the bolt deformation as result of joint shear displacement". Chinese Rock Mechanics and Engineering. October 2004. Vol. 23-19. p. 3268-3273.
- [10] Grasselli G. "3D behaviour of bolted rock joints: experimental and numerical study". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. January 2005. Vol. 42-1. p. 13-24. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.06.003>
- [11] Jalalifar H, Aziz N. "Analytical behaviour of bolt-joint intersection under lateral loading conditions". Rock Mechanics and Rock Engineering. February 2010. Vol. 43-1. p. 89-94. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-009-0032-6>
- [12] Zhang W, Liu QS. "Synthetical deformation analysis of anchor bolt in jointed rock mass". Rock and Soil Mechanics. April 2012. Vol. 33-4, p. 1067-1074.
- [13] Wang FL, Liu CH, Gong Z. "Mechanisms of bolt support for bedding rock slopes". Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. July 2014. Vol. 33-7. p. 1465-1470.
- [14] Wei W, Jiang QH, Zhou CB. "A mechanical model of a bolt in the vicinity of a joint and its numerical manifold method (NMM) application". Engineering mechanics. November 2014. Vol. 31-11, p. 70-78. DOI: <http://dx.doi.org/10.6052/j.jissn.1000-4750.2013.01.0016>
- [15] Chen Y. "Experimental study and stress analysis of rock bolt anchorage performance". Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. October 2014. Vol. 6-5, p. 428-437. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.06.002>
- [16] Li L, Hagan PC, Saydam S, Hebblewhite B, Li Y. "Parametric study of rockbolt shear behaviour by double shear test". Rock Mechanics and Rock Engineering. July 2016. Vol. 49-12. p. 4787-4797. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-016-1063-4>
- [17] Srivastava LP, Singh M. "Effect of fully grouted passive bolts on joint shear strength parameters in a blocky mass". Rock Mechanics and Rock Engineering. May 2015. Vol. 48-3. p. 1197-1206. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-014-0615-8>
- [18] Li XW, Aziz N, Mirzaghobanali A, Nemcik J. "Comparison of the shear test results of a cable bolt on three laboratory test apparatuses". Tunnelling and Underground Space Technology. January 2017. Vol. 61. p. 82-89. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2016.10.003>
- [19] Gattesco N, Boem I. "Stress distribution among sheathing-to-frame nails of timber shear walls related to different base connections: Experimental tests and numerical modelling". Construction and Building Materials. September 2016. Vol. 122. p. 49-162. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.079>
- [20] Wang SR, Hagan PC, Cao C. *Advances in Rock-support and Geotechnical Engineering*. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2016. 410 p. ISBN: 978-0-12-810552-8
- [21] Ferrero AM. "The shear strength of reinforced rock joints". International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts. September 1995. Vol. 32-6. p. 595-605. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(95\)00002-X](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(95)00002-X)
- [22] Liang YT, He MC, Wang SR, Ren T. "A mechanical model for cone bolts". Computers and Geotechnics. March 2017. Vol. 83, p. 142-151. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.10.017>

ACKNOWLEDGEMENTS

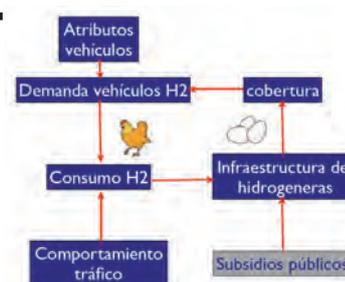
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51474188; 51474097; 51074140), the Natural Science Foundation of Hebei Province of China (E2014203012), the International Cooperation Project of Henan Science and Technology Department (162102410027), the Doctoral Fund of Henan Polytechnic University (B2015-67), and Program for Taihang Scholars.

SUPPLEMENTARY MATERIAL

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/8325-1.pdf



Modelo logit anidado para determinar la expansión de los vehículos de hidrógeno (pilas de combustible) en España. Análisis de sensibilidad de los principales atributos



Nested logic model to determine the expansion of fuel cell electric vehicles in Spain. Sensitivity analysis of the key attributes



Carlos Fúnez Guerra¹, María Jaén Caparrós¹, Lourdes Rodríguez Mayor², Eusebio Angulo Sánchez-Herrera³, Doroteo Verastegui-Rayo³, Ricardo García-Ródenas⁴, Carmen Clemente-Jul⁵ y Lorenzo Reyes-Bozo⁶

¹ Centro Nacional del Hidrógeno. Prolongación Fernando el Santo, s/n – 13500 Puertollano (Ciudad Real).

² Universidad Europea de Madrid. Centro de Excelencia en Arquitectura, Ingeniería y Diseño. C/ Tajo, s/n – 28670 Villaviciosa de Odón (Madrid).

³ Universidad de Castilla La Mancha. Escuela de Ingeniería Minera e Industrial de Almadén. Plaza Manuel Meca, s/n – 13400 Almadén (Ciudad Real).

⁴ Universidad de Castilla La Mancha. Escuela Superior de Informática. Paseo de la Universidad, 4 – 13071 Ciudad Real.

⁵ Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. Departamento de Energía y Combustibles. Ríos Rosas, 21 – 28003 Madrid.

⁶ Universidad Central de Chile. Toesca 1783. Santiago (Chile).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8093> | Recibido: 24/06/2016 • Evaluado: 01/07/2016 • Aceptado: 06/09/2016

ABSTRACT

• The use of Alternative Fuel Vehicles (AFV) as the Fuel Cell Vehicles (FCV)¹, to replace vehicles powered by internal combustion engines, are a clear alternative of road transport that may provide, in the long term, security in energy supply at least partly, reduction in greenhouse gas emissions and improvement of air quality in cities.

There are six areas, which should be addressed in order to guarantee market penetration of environmentally friendly cars: (a) purchase price, (b) running costs, (c) availability of refuelling stations, (d) vehicle range before refuelling, (e) refuelling time and, (f) CO₂ emissions per kilometer².

Location models are intended to accelerate the market penetration of FCV, making efficient decisions about infrastructure design.

Infrastructure (supply) enables to demand. However, in order for the infrastructure to be economically viable, there must already exist a given level of demand.

In this work, we describe one part of the bi-level developed model, simulating the behaviour of H₂ vehicle users. We use a discrete choice model to represent how users acquire FCV during the study period. The hierarchic nested logit model chosen for this study has been widely used in the field of transport.

The process of choosing a FCV is the next. At the higher level a user chooses to purchase a conventional vehicle (alternative b) or an AFV (alternative a). At the lower level AFV users choose the type of alternative fuel.

With the nested logit model it is possible to perform sensitivity analysis, which allows to observe how it affects each of the attributes in the usefulness of each type of vehicle and therefore the sale of the vehicle.

• **Key Words:** nested logit, fuel cell vehicles, refuelling stations, behaviour, conventional vehicles.

reemplazar a los vehículos impulsados por motores de combustión interna, son una clara alternativa del transporte por carretera que puede proporcionar, a largo plazo, seguridad en el suministro de energía, reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y mejora de la calidad del aire en las ciudades. Para garantizar la penetración en el mercado de estos vehículos ecológicos, se deben abordar seis aspectos fundamentales: (a) precio de compra, (b) costes de funcionamiento, (c) disponibilidad de estaciones de repostaje, (d) autonomía de los vehículos, (e) tiempo de repostaje y (f) emisiones de CO₂ por kilómetro.

Con los modelos de localización se pretende acelerar la penetración de los FCV en el mercado, tomando decisiones eficientes sobre el diseño de la infraestructura. Una infraestructura adecuada (oferta) generará la demanda de estos vehículos. Sin embargo, para que la infraestructura sea económicamente viable debe de existir ya un nivel adecuado de demanda.

En este trabajo, describimos una parte del modelo binivel que simula el comportamiento de los usuarios de los vehículos de H₂. Utilizamos un modelo de elección discreta para representar cómo los usuarios adquieren los FCV durante el período en estudio. El modelo logit anidado jerárquico, elegido para este estudio, ha sido ampliamente utilizado en el campo del transporte. En el nivel superior del proceso de elegir un FCV, un usuario elige comprar un vehículo convencional (alternativa b) o un AFV (alternativa a). En el nivel inferior, los usuarios de AFV eligen el tipo de combustible alternativo.

Con el modelo logit anidado, es posible realizar un análisis de sensibilidad que permita observar cómo afecta cada uno de los atributos a la utilidad de cada tipo de vehículo y, por tanto, a su venta.

Palabras clave: logit anidado, vehículos de pila de combustible, estaciones de repostaje, comportamiento, vehículos convencionales.

RESUMEN

El uso de vehículos de combustibles alternativos (AFV), como los vehículos de hidrógeno (pilas de combustible) (FCV), para

1. INTRODUCCIÓN

El uso de Vehículos de Combustible Alternativo (AFV), para sustituir a los vehículos de combustión interna, es una forma al-

ternativa de transporte por carretera que puede proporcionar, a largo plazo, seguridad en el suministro de energía, reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y mejora de la calidad del aire en las ciudades [1-3].

Hoen y Koetse [4] señalaron cinco aspectos que deben abordarse para garantizar la penetración en el mercado de los vehículos ecológicos: a) precio de compra, b) costes de funcionamiento, c) autonomía d) tiempo de repostaje y (e) disponibilidad de estaciones de repostaje.

Los modelos de localización pretenden acelerar la penetración de los AFV en el mercado, tomando decisiones eficientes sobre el diseño de la infraestructura. Uno de los principales problemas que deben ser tenidos en cuenta en el despliegue de la infraestructura necesaria para el uso de combustibles alternativos en el transporte y el denominado "problema del huevo y de la gallina" [3]. La infraestructura (oferta) propicia la demanda. Pero para que la infraestructura sea económicamente viable debe de existir ya un nivel adecuado de demanda. La Fig. 1 muestra los elementos esenciales de este círculo vicioso que involucra a la oferta y a la demanda.

Este problema requiere de colaboración entre la iniciativa pública y la privada para superar la etapa inicial del mercado de los vehículos AFV. Inicialmente, una política temporal de subsidios gubernamentales puede romper el círculo vicioso presentado en el párrafo anterior. Dicha política debe tener como objetivos: i) diseñar una red inicial de estaciones, situadas en ubicaciones coordinadas, que minimice los subsidios gubernamentales requeridos para maximizar la utilidad de las estaciones construidas o ii) diseñar políticas para que las estaciones de repostaje existentes tengan un incentivo para incluir combustibles alternativos entre sus productos. Los subsidios deben destinarse a las estaciones más convenientes, por lo que parte de la subvención debe utilizarse para recompensar la cantidad de combustible alternativo vendido por cada estación, y la otra parte para subsidiar los costes de inversión, y ambas partes deben ser dependientes del tiempo para aprovechar los mecanismos dinámicos hasta la madurez del mercado de vehículos AFV.

El problema se aborda desde el punto de vista ii) y considera los cinco elementos mencionados en la Fig. 1. Se establece un modelo de equilibrio de Stackelberg para diseñar y evaluar políticas óptimas de subsidios para favorecer el crecimiento de la infraestructura de combustibles alternativos (AF). El Estado desempeña el papel de líder y los propietarios de las estaciones de repostaje son sus seguidores. El líder desea diseñar una política de subsidios para

minimizar la inversión requerida para implementar la infraestructura necesaria de la forma más efectiva. Por otra parte, los propietarios de las estaciones de repostaje deciden, dinámicamente, si instalan combustibles alternativos (variables de nivel inferior) en función del beneficio estimado de la inversión, basándose en la actual política de subsidios y en la demanda de AF.

El modelo incorpora el comportamiento de los agentes del proceso (el Estado, los propietarios de estaciones de repostaje y los propietarios de FCV) en un contexto dinámico de competencia entre estaciones de repostaje. El aspecto de la competencia es nuevo en la literatura, ya que la mayoría de los estudios asumen una colocación coordinada, es decir, un monopolio en la propiedad de las estaciones o, de manera equivalente, la existencia de un Estado que puede obligar al propietario a establecer una estación AF. El objetivo es maximizar los beneficios del único propietario corporativo o maximizar la cobertura global de la red.

En el modelo el cambio en el número de estaciones AF, y su ubicación, depende del cambio en las subvenciones que reciben los propietarios de las estaciones AF del Estado y del cambio en el número y distribución espacial de los AFV, lo que, a su vez, depende del despliegue de la infraestructura.

La infraestructura de combustibles alternativos se centra en las pilas de combustible de hidrógeno (FC), por lo que se consideran los vehículos con pila de combustible (FCV).

El modelo binivel para la ubicación de las estaciones de repostaje de hidrógeno está formado por cinco submodelos:

- i) El modelo del tráfico que intenta describir cuántos viajes hace un usuario, el origen y el destino de estos viajes y la ruta por la que se realizan.
- ii) La demanda de los AFV, estos modelos describen la decisión de los usuarios de adquirir un AFV, dependiendo de un conjunto de atributos tales como el precio de compra, la disponibilidad de combustible alternativo, entre otros, y así predecir el desarrollo de la penetración de los FCV en las carreteras.
- iii) Modelización de las estaciones de repostaje con hidrógeno, que trata de predecir el desarrollo del número de estaciones de recarga, su tipología y su ubicación en el tiempo y en el espacio. Todas las estaciones de servicio existentes son analizadas para identificar cuáles pueden acomodar puntos de recarga de hidrógeno.
- iv) Identificación del índice de cobertura de la infraestructura, que dependerá del número de estaciones de recarga de hidrógeno instaladas y sus ubicaciones espaciales.
- v) Política de subsidios gubernamentales para la compra de vehículos, fabricación de vehículos y/o despliegue de estaciones de hidrógeno hasta lograr un mercado sostenible de combustibles alternativos.

El modelo binivel, desarrollado para la localización de estaciones de reabastecimiento de hidrógeno, tiene como objetivo responder a los requisitos exigidos por la Directiva Europea 2014/94 / UE sobre el despliegue de infraestructura de combustibles alternativos. La mencionada directiva establece un marco común de medidas para el despliegue de infraestructuras de combustibles alternativos en la Unión Europea a fin de reducir al mínimo la dependencia del petróleo y mitigar el impacto medioambiental del transporte.

En este artículo, nos centramos en el modelo de comportamiento de los usuarios de vehículos alternativos. Estos modelos describen la decisión de los usuarios de adquirir un AFV.

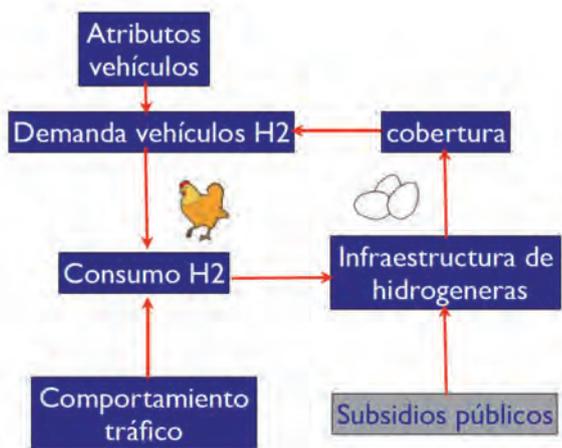


Fig. 1: Representación simplificada de los elementos que intervienen en el proceso de oferta y demanda del mercado de vehículos de combustible alternativo

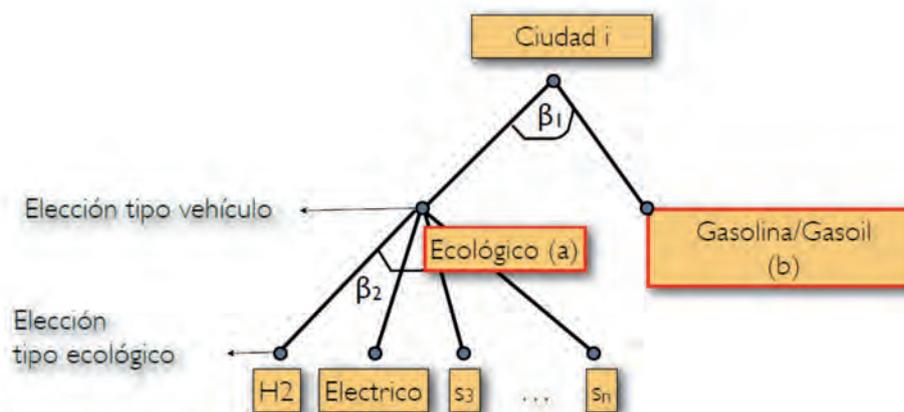


Fig. 2: Modelo logit anidado para la elección del vehículo a comprar

2. MATERIALES Y MÉTODOS (MODELO LOGIT ANIDADO)

En esta sección, usamos un modelo de elección discreta para representar cómo los usuarios adquieren los FCV durante el período de estudio. El modelo jerarquizado logit anidado ha sido ampliamente utilizado en el campo del transporte [5 - 7], y es el modelo elegido para este estudio.

El *modelo logit anidado* (Fig. 2) muestra el proceso de elegir un FCV. En el nivel superior un usuario elige comprar un vehículo convencional (alternativa b) o un AFV (alternativa a). En el nivel inferior, los usuarios de AFV eligen el tipo de combustible alternativo.

Sea \bar{g}_j^t la previsión de ventas de vehículos durante el periodo t en la ciudad j . El modelo desagrega las ventas totales de vehículos por tipo de combustible alternativo. En la primera decisión, una persona de la ciudad j en el instante t tiene dos alternativas al comprar un vehículo: (a) AFV o (b) vehículo convencional. El primer nivel del modelo divide los vehículos vendidos entre las alternativas (a) y (b) de la siguiente manera:

$$g_j^{a,t} = \frac{\exp(\beta_1 U_j^{m,t})}{\sum_{m \in \{a,b\}} \exp(\beta_1 U_j^{m,t})} \cdot \bar{g}_j^t \quad m \in \{a,b\} \quad (1)$$

donde $U_j^{m,t}$ es la utilidad de la alternativa m para usuarios de la ciudad j en el periodo t . β_1 y α , son los parámetros obtenidos de la calibración del *modelo logit anidado*.

El segundo nivel del *modelo logit anidado* desagrega los AFV en dos tipos de combustible S mediante la siguiente expresión:

$$g_{j,s}^{a,t} = \frac{\exp(\beta_2 U_{j,s}^{a,t})}{\sum_{s' \in S} \exp(\beta_2 U_{j,s'}^{a,t})} \cdot g_j^{a,t} \quad s \in S \quad (2)$$

Los modelos logit anidados calculan la utilidad de los coches alternativos $U_j^{a,t}$ como el "logaritmo-sumatorio" de las utilidades de tipo ecológico:

$$U_j^{a,t} = \frac{1}{\beta_2} \ln \left[\sum_{s \in S} \exp(\beta_2 U_{j,s}^{a,t}) \right] \quad (3)$$

Hoehn and Koetse [4] realizan una revisión de los diversos atributos utilizados en anteriores experimentos sobre la elección de AFV. Estos autores señalan que el precio de compra, los costes operativos, la autonomía, el tiempo de repostaje y la disponibili-

dad de estaciones de repostaje pueden tener efectos sustanciales sobre las decisiones de los consumidores por los AFVs. La reducción de emisiones también se señala como un factor importante. Por este motivo, este trabajo considera la utilidad lineal:

$$U_{j,s}^{a,t} = \alpha_1 pv_s^t + \alpha_2 pc_s^t + \alpha_3 co_{j,s}^t + \alpha_4 dr_s^t + \alpha_5 rt_s^t + \alpha_6 e_s^t \quad (4)$$

donde:

- pv_s^t es el precio de compra en € del vehículo s en el periodo t .
- pc_s^t es el precio del combustible en € en el periodo t y para el vehículo de tipo s (haciendo la conversión para la energía equivalente a un litro de diésel).
- $co_{j,s}^t$ es la cobertura desde la ciudad j para el vehículo de tipo s en el periodo t en kilómetros. Definimos la cobertura en un par $\omega = (j,j')$ como la máxima distancia entre dos hidrogeneras consecutivas de la ruta mínima satisfaciendo el par ω que es la cobertura entre ciudades. Además, para calcular la cobertura dentro de la ciudad se aproximó utilizando la simulación de Montecarlo y aproximaciones geométricas. En el modelo binivel para la localización de hidrogeneras, la cobertura tiene su propio modelo.
- dr_s^t es la distancia recorrida en kilómetros en el periodo t y para el vehículo de tipo s (entendiendo la autonomía como número de kilómetros que es posible realizar con un 100% de combustible de recarga).
- rt_s^t es el tiempo de recarga en minutos en el periodo t para el vehículo de tipo s (es el tiempo requerido para el reabastecimiento al 100% de capacidad).
- e_s^t son las emisiones de CO_2 del tipo de vehículo s en el periodo t (se determinará gCO_2 por kilómetro).

Los valores de los distintos atributos de cada tipo de vehículo en los años de estudio se pueden ver en el Apéndice 1.

Hoehn and Koetse [4] sugieren que atributos como lo autonomía, largos periodos de recarga de combustible y la disponibilidad limitada de recargar el combustible son en gran medida responsables de las preferencias de los consumidores en los primeros años. Todos estos atributos son recogidos en nuestro modelo.

Finalmente, el número total de vehículos FCV (suponemos que el período de obsolescencia del vehículo es mayor que el período de estudio) presente en la ciudad j en el período t es:

$$G_j^t = \sum_{t'=0}^t g_{j,t'}^{a,t'} \quad (5)$$

La evolución dinámica de los atributos, exceptuando la cobertura de la infraestructura, es exógena al modelo propuesto e introduce premisas sobre el progreso tecnológico y los precios de la energía en el modelo.

No todas las incertidumbres relevantes han sido incluidas en el análisis. El objetivo es el diseño dinámico de los subsidios anticipados para asegurar una provisión adecuada de infraestructura de reabastecimiento. Estas subvenciones deben diseñarse de acuerdo con la evolución de los factores tecnológicos y la evolución de las economías de escala en la producción de AFV.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se ha realizado un caso de estudio del problema desarrollado en las cinco ciudades españolas de mayor población (nodos) y seis autopistas (arcos) utilizadas para la comunicación entre las mismas. Las autopistas pertenecen a la red de transporte de *Trans-European*. La Fig. (3) representa el problema del caso de estudio.



Fig. 3: Caso de estudio

El Modelo *Nested Logit* predice la evolución de venta de vehículos. Se ha realizado un ejercicio de ingeniería inversa para calibrar el modelo. Coincidiendo con estudios prospectivos para determinar la evolución de las ventas de vehículos y para la determinación de los atributos de cada tipo de vehículo.

El modelo requiere la estimación de las ventas totales de vehículos de varios años como puede observarse en Fig (4). Se encontró que el número de vehículos vendidos o vehículos registrados está correlacionado con el PIB per cápita (producto interior bruto). Esta correlación queda patente en la Fig. (4).

Con la correlación mencionada anteriormente, las previsiones de evolución del PIB en España (Fig. 5) y las estimaciones de la

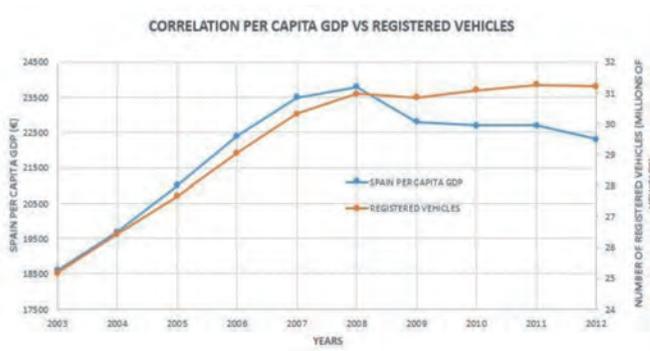


Fig. 4: Correlación en el PIB per cápita y los vehículos matriculados (Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Dirección General de Tráfico)

Crecimiento del PIB entre los años 2013- 2033



Fig. 5: Crecimiento del PIB entre los años 2013-2033 (Fuente: PricewaterhouseCoopers)

evolución de la población del Instituto Nacional de Estadística, es posible estimar las ventas de vehículos en los años siguientes (Tabla 1).

Se ha hecho el modelo de calibración mediante CNML (Probabilidad Máxima Normalizada Condicional), con el objetivo de que el modelo *nested logit* encaje con la mayor precisión posible a los estudios prospectivos.

Fig. (6) muestra los resultados obtenidos. Se observa que el modelo reproduce el comportamiento prospectivo para los cuatro tipos de vehículos (convencional, eléctrico, hidrógeno y gas natural comprimido).

En la calibración del modelo cada atributo fue estandarizado entre 0 y 1 y se ha realizado un modelo de análisis calibrado con respecto a cada atributo para el cual se realiza el análisis de sensibilidad (todos los atributos se han obtenido de la literatura excepto el atributo de cobertura calculado en otra parte del modelo).

Los datos utilizados para los atributos se han obtenido a partir de informes prospectivos de movilidad de coches de H₂ en el Reino Unido, el Programa de Innovación Nacional (NIP) en Alemania y otros estudios prospectivos. Los valores asignados a los atributos de los diferentes tipos de vehículos en los diferentes años se pueden ver en el *Apéndice 1*.

Fig. (7) muestra el análisis de sensibilidad de la cobertura. El eje X muestra el valor de la cobertura y el eje Y muestra la proporción de ventas de automóviles en %. El valor del eje X está entre

AÑO	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
VENTA DE VEHÍCULOS (millones de unidades)	1.02	1.04	1.06	1.08	1.1	1.05	1.00	0.995	0.99	0.985	0.98	0.97	0.96	0.955	0.950

Tabla 1: Estimación de venta de vehículos 2016-2030

300 y 0 kilómetros de cobertura para coches de hidrógeno. En el período actual $t = 1$, los atributos de cobertura no tienen ningún efecto sobre la venta de vehículos de hidrógeno. En $t = 15$ con sus respectivos atributos, la cobertura tiene un efecto sobre las ventas que van desde alrededor del 2% con una red de cobertura 1 (el peor) a más del 30% con la cobertura más amplia posible.

Fig. (8) muestra el análisis de sensibilidad del precio de compra. El eje X muestra el valor del precio de compra y el eje Y muestra la proporción de ventas de automóviles en porcentaje. El valor del eje X es entre 50 k € y 0 k € del precio de compra del vehículo de hidrógeno. En el período actual $t = 1$ el precio de compra no tiene ningún efecto sobre la venta de vehículos de hidrógeno. En

$t = 15$ con sus respectivos atributos, el precio de compra tiene un efecto sobre las ventas que van desde alrededor de 3% con un precio de compra 1 (el peor) a más del 95% con el precio de compra más barato.

4. CONCLUSIONES

El análisis de los problemas resueltos muestra que el modelo funciona bien. Se obtienen resultados consistentes según estudios prospectivos tomados como referencia.

Se analiza el comportamiento de los usuarios de los vehículos frente a cambios en los atributos. En concreto, se ha cambiado el atributo de cobertura y el precio de compra y se han observado cambios en el comportamiento de la venta de vehículos y su penetración en el mercado.

En las pruebas realizadas se puede observar que con una baja cobertura (pocas estaciones de servicio), las venta de coches de hidrógeno sea baja y como con cobertura alta (muchas estaciones de servicio) hace que la venta de vehículos de hidrógeno sea alta. Por último, con precios de compra altos las ventas de vehículos de hidrógenos son bajas.

Este modelo predice cómo se comportará la penetración de los vehículos de combustible alternativo en función de la variación de los diferentes atributos que determinan la utilidad del vehículo.

Se ha desarrollado una herramienta realmente útil que permite a los fabricantes de automóviles estimar el valor que tienen que tomar los atributos como el coste del vehículo, rango y tiempo de recarga, para hacer que su penetración en el mercado sea mayor.

Utilizando esta herramienta, el Gobierno español puede conocer información sobre la cober-

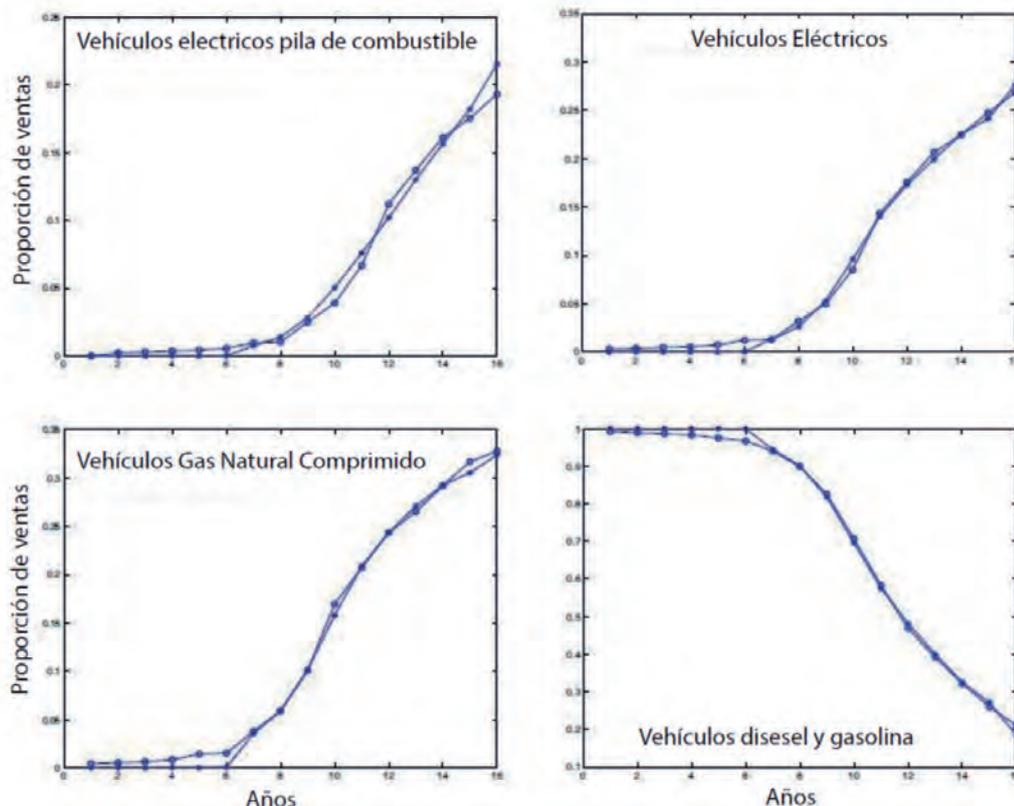


Fig. 6: Estimación del Modelo Nested Logit. Ventas estimadas y ventas observadas con Modelo CNML

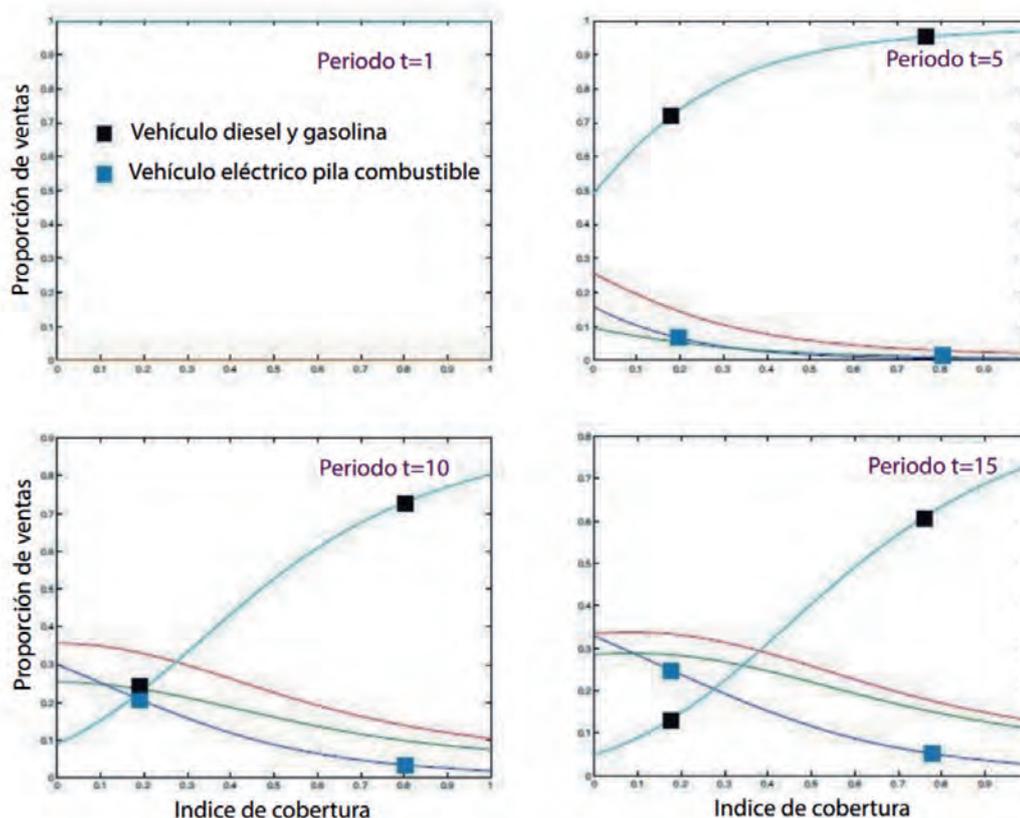


Fig. 7: Análisis de sensibilidad del atributo de cobertura

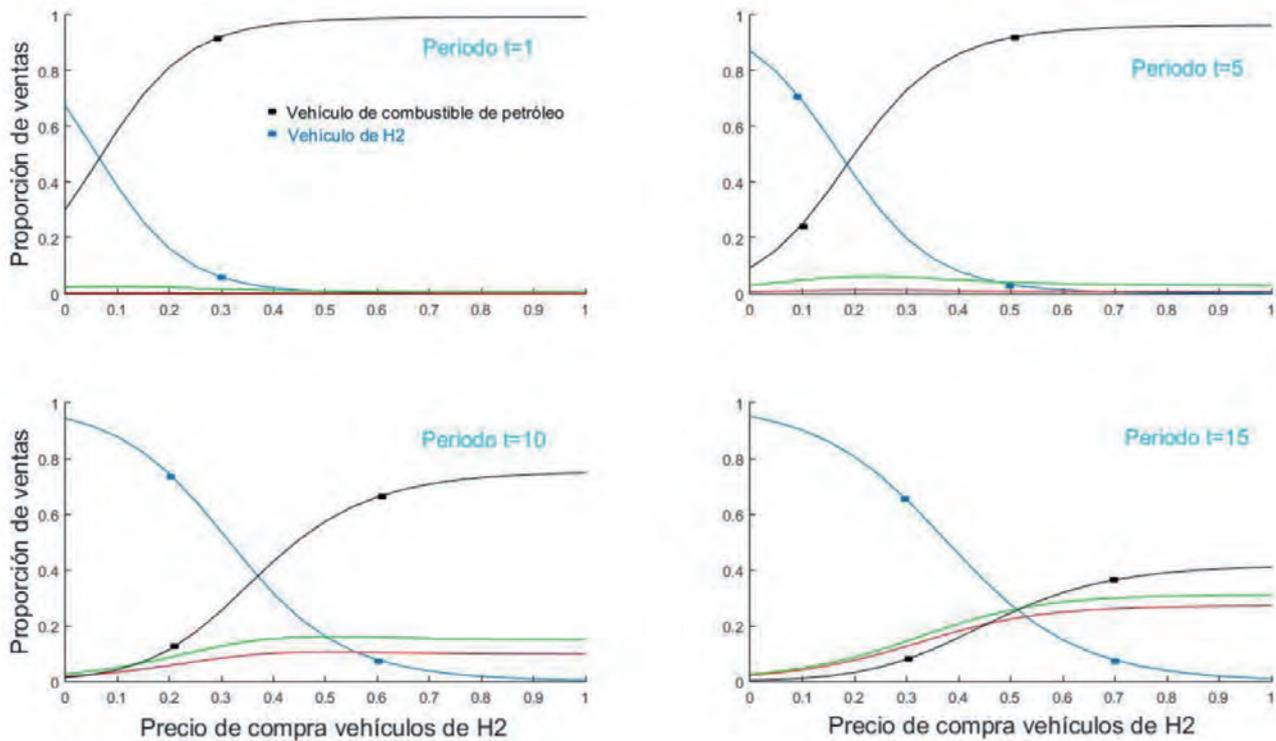


Fig. 8: Análisis de sensibilidad del atributo precio de compra

tura necesaria (o lo que es lo mismo el número de estaciones de recarga de hidrógeno) para la penetración del Vehículo Eléctrico de Pila de Combustible.

Finalmente, también es posible analizar el impacto que tendría el nivel de emisiones de CO₂ en la venta de diferentes tipos de vehículos.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado entre el Grupo MAT (Modelos y Algoritmos en Sistemas de Transporte) de la Universidad de Castilla-La Mancha, la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y el Centro Nacional de Hidrógeno (CNH₂) con el apoyo financiero del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO), el Gobierno de Castilla-La Mancha (JCCM) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) 2007-2013 incluidos en el "Programa Operativo de I+D+i para el Beneficio de las Empresas - Fondo Tecnológico".

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] Rosa-Tudela P, Morales-García J, Buiza-Camacho G, et al. "Methodology for estimation of capacity of electricity grid facing introduction of electric vehicles for urban distribution of goods into cities". DYNA Energía y Sostenibilidad, January-December 2015, Vol. 4-1. p1-14. (DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/ES7602>).

[2] Stephens-Romero SD, Brown TM, Kang JE, et al. "Systematic planning to optimize investments in hydrogen infrastructure deployment". International Journal of Hydrogen Energy. May 2010. Vol. 35-10, p.4652-4667. (doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.02.024).

[3] Wang Y, Wang C. "Locating passenger vehicle refueling stations". Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. September 2010. Vol. 46-5. p791-801. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2009.12.001>).

[4] Hoen A, Koetse MJ. "A choice experiment on alternative fuel vehicle preferences of private car owners in the Netherlands". Transportation Research Part A: Policy and Practice. March 2014. Vol. 61. p.199-215. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2014.01.008>).

[5] Ben-Akiva M, Lerman S. Discrete Choice Analysis: Theory and Application

to Travel Demand. 1 edition. MIT Press, 1987. 384p. ISBN 9780262022170.

[6] García R, Marín A. "Network equilibrium with combined modes: models and solution algorithms". Transportation Research Part B: Methodological. March 2005. Vol. 39-3. p.223-254. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2003.05.002>).

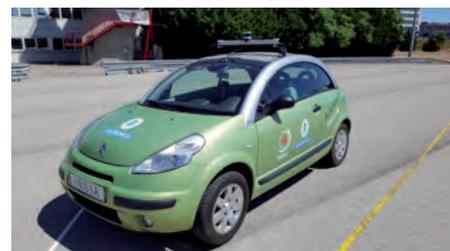
[7] Oppenheim N. Urban Travel Demand Modeling: From Individual Choices to General Equilibrium. 1 edition. A Wiley-Interscience Publication, Wiley, 1995. 480p. ISBN 97804711557234.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/8093-1.pdf



Guiado de vehículos autónomos mediante lidar 3D siguiendo un elemento de referencia



Reference element guidance of autonomous vehicles using 3D laser scanner



José E. Naranjo-Hernández, Felipe Jiménez-Alonso, Miguel Clavijo-Jiménez y Óscar Gómez-Casado

Universidad Politécnica de Madrid. Instituto Universitario de Investigación del Automóvil (INSIA). Campus Sur de la UPM. Carretera de Valencia, km. 7 - 28031 Madrid. Tfno: +34 91 336 52 87

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8054> | Recibido: 12/05/2016 • Evaluado: 12/05/2016 • Aceptado: 11/07/2016

ABSTRACT

- Every transportation plan in the medium and long term consider autonomous vehicles as a key solution for transport, which will reduce to a minimum traffic accidents and congestion, maximizing the use of the road. However, at present, these vehicles are still under development and they are not with acceptable figures for the placing on the market. A fundamental element on today obstacle detection is the laser scanner, which provides a three dimensional mesh that can represent all objects that are at a distance of 200 meters from the vehicle. Furthermore, the combination of GPS with inertial systems allows precise positioning on the road, if necessary reinforced with computer vision to achieve lane level positioning. However, there are situations, such as tunnels or urban roads with poor reception of GPS signals that make this positioning can be complicated, so much so that the autonomous vehicle requires human intervention to maintain the trajectory. This article describes a use of laser scanner technology to support positioning and maintaining the position even when the GPS and inertial systems are not sufficient to maintain the route. This system will be complementary to conventional guidance systems and works in parallel without interference obstacle detection system for autonomous vehicles. It has also been tested and validated in real situations autonomous vehicles driving at high speeds on real roads.
- Keywords: Autonomous vehicle, laser scanner, LiDAR, GPS positioning.

RESUMEN

Los estudios sobre transporte a medio y largo plazo consideran la conducción autónoma como una solución clave, que reducirá a un mínimo los accidentes y la congestión del tráfico, potenciando el uso de la carretera. Sin embargo, en la actualidad, estos vehículos están todavía en desarrollo y, aunque existen numerosos desarrollos parciales, aún no se encuentra en situación aceptable para la puesta en el mercado. Un elemento fundamental hoy día para la detección de obstáculos es el láser 3D, que proporciona una nube de puntos de tres dimensiones que puede representar todos los objetos que se encuentran a una distancia máxima de 200 metros del vehículo. Además, la combinación de GPS con sistemas inerciales permite un posicionamiento preciso sobre la carretera, incluso si es necesario, reforzado con visión artificial para lograr un posicionamiento a nivel de carril. Sin embargo, hay situaciones, tales como túneles o vías urbanas con mala recepción de las se-

ñales GPS que hacen que este posicionamiento pueda ser complicado, tanto es así que el vehículo autónomo requiera intervención humana para mantener la trayectoria. Este artículo describe un uso de la tecnología LiDAR 3D como apoyo en el posicionamiento y el mantenimiento de la trayectoria incluso cuando el GPS y los sistemas inerciales no son suficientes para mantener la ruta. Este sistema sería complementario a los sistemas de guiado convencionales y trabaja en paralelo sin interferir en el sistema de detección de obstáculos para vehículos autónomos. También se ha probado y validado en situaciones reales de conducción de vehículos autónomos a altas velocidades en carreteras reales.

Palabras clave: Vehículo autónomo, láser escáner, LiDAR, posicionamiento GPS.

1. INTRODUCCIÓN

Los vehículos autónomos son un área consolidada en el ámbito de los sistemas inteligentes de transporte [1], que ha tomado gran interés a partir de las recientes presentaciones de los coches de Google. Sin embargo, diversos grupos de investigación han estado trabajando en este campo durante más de 20 años. Destacamos los trabajos de INRIA [2], Autopia [3], CMU [4], PATH [5] o Parma [6], entre otros. Por otro lado, sigue siendo una tecnología en pleno crecimiento, donde grandes empresas, además de Google, como Tesla, Audi, BMW, Ford, Volvo, entre otras, están tomando partido, no sólo a la hora de seguir desarrollando este tipo de vehículos, sino también elaborando un marco legal que facilite la investigación e implantación de esta nueva solución de transporte [7]. De esta forma, los diferentes fabricantes han demostrado las funcionalidades de prototipos de vehículos autónomos, si bien todavía resta bastante trabajo para llegar a la automatización total Nivel 5 [1], principalmente en entornos complicados y a un coste asequible.

Estos vehículos autónomos tienen en común la capacidad de realizar dos tareas distintas: la identificación de obstáculos para evitar accidentes y el posicionamiento para realizar un seguimiento de una ruta. Estos dos problemas siguen en desarrollo desde los primeros estudios, y, sin embargo, todavía no existe una solución general para ambos, en cuanto al cumplimiento de los requisitos de fiabilidad, robustez, eficiencia y costo asequible, sobre todo en entornos de carretera complejos.

Para la detección de obstáculos se utilizan diferentes tecnologías como el radar [8, 9], visión artificial [10, 11] o láser 2D y 3D [12-14], incluso combinando dos o más de los mismos, siendo la

solución más extendida la fusión de escáner láser y visión artificial [15-17]. Adicionalmente, se integran sistemas de detección de corto alcance como ultrasonidos [18]. Cada tecnología de detección de obstáculos tiene sus ventajas e inconvenientes desde el punto de vista de la fiabilidad, la cobertura, los requisitos de procesamiento, la robustez y el coste [19], pero en los últimos tiempos el sensor más extendido en vehículos autónomos es el láser 3D que es capaz de generar una malla tridimensional de 360° que representa el entorno de un vehículo a una distancia entre 100 y 200 metros [20].

El otro elemento clave para situar el vehículo autónomo en la carretera es el posicionamiento preciso. Localizar un vehículo autónomo con una precisión de un carril es fundamental para garantizar un guiado seguro. En este caso, el principal sensor que asegura este posicionamiento es el receptor GPS, que puede llegar a proporcionar posiciones con una precisión de hasta 1 cm [21]. Sin embargo, es común encontrar situaciones en las que la recepción de la señal GPS sea pobre e, incluso, llega a perderse, como en tráfico urbano o túneles. Para esos casos, el posicionamiento GPS se suele complementar con sistemas inerciales que pueden mantener la posición con la precisión adecuada durante un corto periodo de tiempo [22, 23]. Este tiempo depende del tipo de carretera por la que se hace circular, el número de curvas, radio de éstas y los diferentes peraltes en la trayectoria del vehículo, siendo ineficaces en túneles de gran longitud [24]. Para superar esta limitación, algunos vehículos autónomos equipan los sistemas de visión artificial para detectar las líneas de la carretera [25, 26], que son capaces de ayudar al sistema de guiado para mantener el vehículo en el carril, pero con un posicionamiento muy precario.

En este artículo se presenta un sistema complementario para mantener la posición de los vehículos autónomos sin añadir elementos adicionales a la arquitectura estándar de sensores, empleando un láser 3D, utilizado para la detección de obstáculos, para posicionar el vehículo en situaciones en las que el receptor GPS falla o da una precisión por debajo de la requerida. Este uso no interfiere con la detección de obstáculos por lo que se asigna una función dual para este sensor, que puede detectar los bordes de la carretera o elementos que la delimiten, según el caso, para calcular la posición relativa en el carril del vehículo con suficiente garantía de seguridad y robustez. Así, se propone un método complementario a las formas clásicas de guiado basadas en GPS empleando un láser que, aunque resulta costoso, es más económico que los empleados comúnmente por los fabricantes que son de 64 capas. Para probar este sistema, se ha implementado un vehículo autónomo con este equipo y ha sido probado a alta velocidad en túneles y carreteras.

2. PERCEPCIÓN MEDIANTE ESCÁNER LÁSER

El láser 3D es un sensor utilizado en automoción para detectar objetos que puedan aparecer en 360° alrededor de un vehículo. Este sensor utiliza la tecnología LiDAR para detectar la distancia a un obstáculo, así como la intensidad de su reflectividad. El láser escáner 2D convencional equipa un prisma de rotación que permite la separación de haces consecutivos un mismo ángulo, detectando los obstáculos situados en el mismo plano. En los sensores 3D, se añade un grado de libertad adicional, haciendo la detección sobre superficies cónicas de vértice el propio sensor, generando la vista 3D de los alrededores. En este artículo se plantea el desarrollo de algoritmos de detección del elemento de referencia para el guiado empleando un láser 3D, y se hace su aplicación práctica con un sensor de 16 capas, que pasarán a describirse a continuación.

2.1. EQUIPO EMPLEADO PARA LA PERCEPCIÓN

Se utiliza como sensor de referencia un *Velodyne VLP-16*, un sensor láser 3D, con un máximo de 16 planos distribuidos verticalmente en 30° de campo visual, proporcionando hasta 300.000 puntos por segundo, 360° de campo de visión horizontal y una resolución máxima de 0,1°. El sensor se ha montado en la parte superior de un vehículo (Figura 1).



Fig. 1: Vehículo autónomo de INSIA equipado con sensor láser 3D Velodyne VLP-16

Con este equipo es posible detectar nubes de puntos tridimensionales que representan obstáculos, vehículos, peatones y otros elementos de la carretera. Sin embargo, la información generada por este sensor, también se puede utilizar para detectar los límites de la carretera, así como la separación entre los carriles usando la información de la reflectividad.

A continuación, se ha desarrollado un algoritmo de detección y seguimiento del elemento de referencia de la carretera (barrera lateral o línea del carril) empleado para el guiado autónomo. Así, se han de detectar y seguir dos elementos distintos: las barreras laterales, con el fin de calcular el error angular y lateral del vehículo desde el borde de la carretera, y la ubicación del vehículo entre los carriles de la carretera. Estas dos variables son las necesarias para garantizar un seguimiento de la ruta correcta para la navegación autónoma [27].

2.2. ALGORITMO DE SEGUIMIENTO DE LOS LÍMITES DE LA CARRETERA

La detección de las líneas de la carretera resulta sencilla a partir de la medida de la reflectividad por parte de un escáner láser debido al alto contraste entre el asfalto y la pintura blanca. Resulta más compleja la delimitación de la ruta en base a la detección de barreras laterales como, por ejemplo, quitamiedos o barreras New Jersey, caso para el que se define un algoritmo específico. Éste permite al vehículo estimar una ecuación de segundo grado que representa la trayectoria que debe seguir el vehículo en función de la representación 3D de las barreras laterales de la carretera. El algoritmo tiene que funcionar en un amplio rango de velocidades de circulación, hasta un máximo de 120 km/h.

Se trata de un algoritmo de seis pasos que es capaz de calcular el vector de trayectoria del vehículo en función de la localización de las barreras laterales de la carretera haciendo uso de la nube de puntos obtenida por los 16 canales suministrados por el VLP-16.

Paso 1: En esta primera etapa se define la región de interés (RoI) en función de la distancia de anticipación que depende de la velocidad del vehículo [28], tal y como se define en la Figura 2, donde L es la distancia de anticipación y v es la velocidad del vehículo. Por lo tanto, con esta operación, la carga computacional

se reduce drásticamente debido a que los puntos láser no pertinentes a esta región se descartan. Debe tenerse en cuenta que no se filtran los puntos laterales, sino el alcance en la dirección longitudinal de avance del vehículo. Realmente, el filtro se aplica tanto hacia adelante como hacia atrás y la idea que subyace es el hecho de los puntos detectados más alejados del sensor están sujetos a mayores errores, por lo que se intentan obviar en el ajuste del elemento de referencia si es posible cuando se necesita una menor distancia de anticipación por circular a bajas velocidades.

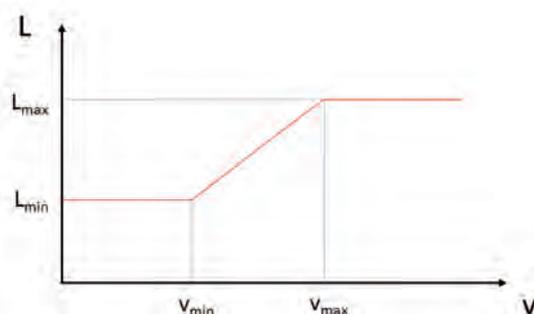


Fig. 2: Descripción del funcionamiento del algoritmo de seguimiento de los límites de la carretera

Paso 2: Tras un primer filtrado de los puntos relevantes, éstos se agrupan en conjuntos de tres según la distancia entre ellos mediante la triangulación de Delaunay. Esta primera agrupación permite la representación de los objetos detectados como un conjunto de superficies, cuyas características permiten su posterior análisis y clasificación.

Paso 3: Una vez que la malla se ha triangulado, la ecuación y el vector normal de cada triángulo se calcula con el fin de tener en cuenta la orientación de la superficie definida. Para cada triángulo con tres vértices $(x_i, y_i, z_i) / i \in [1..3]$ su vector unitario normal se puede calcular en cada uno de ellos (u_x, u_y, u_z) . En primer lugar, los vectores que forman el triángulo están dados por la Ecuación 1.

$$\begin{aligned} \vec{AB} &= (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1) \\ \vec{AC} &= (x_3 - x_1, y_3 - y_1, z_3 - z_1) \end{aligned} \quad (1)$$

El vector normal unitario u se calcula mediante el producto vectorial, según la Ecuación 2:

$$\vec{u}_1 = \frac{\vec{AB} \times \vec{AC}}{\|\vec{AB} \times \vec{AC}\|} \quad (2)$$

Finalmente, con la Ecuación 3 se calcula el ángulo de este vector normal con los tres ejes de coordenadas (Figura 3) con el fin de comparar el ángulo γ (ángulo formado entre el vector y el eje Z) con los límites establecidos para determinar si un triángulo puede considerarse que forma parte de una barrera o no.

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \text{acos}(\vec{u} \cdot \vec{i}) \\ \beta &= \text{acos}(\vec{u} \cdot \vec{j}) \\ \gamma &= \text{acos}(\vec{u} \cdot \vec{k}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Paso 4: Con la información suministrada por los vectores normales de cada superficie, se ejecuta una operación de filtra-

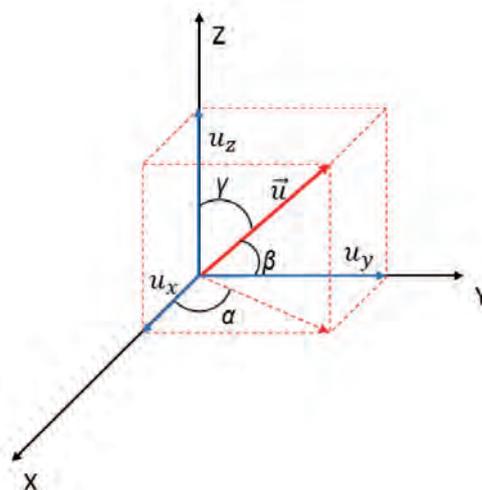


Fig. 3: Sistema de referencia y ángulos del vector normal unitario a un triángulo

do mediante la eliminación de los triángulos cuyo ángulo γ están fuera de un umbral prefijado. En el caso de las barreras verticales New Jersey, los límites del umbral han sido definidos entre 75° y 90° [29]. Si la condición se cumple, los tres vértices del triángulo proyectados sobre el plano horizontal se incluyen como puntos en la lista de candidatos. Por tanto, el cálculo para determinar la segmentación y la forma de la barrera se continúa usando puntos bidimensionales.

Paso 5: El siguiente paso es la segmentación o agrupación de las diferentes nubes de puntos que se detectan como candidatos para representar las barreras laterales. Esta agrupación se basa en la distancia euclídea entre los puntos y su densidad, utilizando el algoritmo de *clustering* DBSCAN (*Density-based spatial clustering of applications with noise*) [30]. Puesto que ya se había hecho una preselección de los puntos del obstáculo, este algoritmo de *clustering* ofrece una baja carga computacional y no se requieren prestaciones superiores. La nube de puntos queda, por tanto, segmentada en los distintos candidatos a formar la barrera. Una vez que esta clasificación es completada, y con el fin de poder realizar la navegación y el posicionamiento del vehículo autónomo, el conjunto seleccionado de puntos será el situado lateral y longitudinalmente al vehículo.

Paso 6: Por último, una vez seleccionada la nube de puntos que identifica la barrera, la función matemática f que define la forma de ésta y, en consecuencia, la ruta que debe seguir el vehículo se calcula utilizando una regresión cuadrática. En este punto, cabe indicarse que los puntos cercanos al escáner láser tienen una mayor influencia en el ajuste de la función, al existir en esa zona una mayor densidad de puntos detectados y asociados a la barrera que delimita la carretera. Con el fin de homogeneizar la relevancia relativa de todos los puntos detectados, se ha definido una función peso a la nube de puntos que incrementa su valor cuanto más lejano del vehículo se encuentre el punto en cuestión.

En este punto es posible calcular las dos principales variables necesarias para asegurar el seguimiento de la trayectoria del vehículo: el error lateral y angular. Para el cálculo de ambos errores, primero se calcula el punto $P(x_0, y_0)$. Este punto forma parte de la regresión (por tanto de la barrera de separación) y una perpendicularmente ésta con el origen de coordenadas $(0, 0)$, donde está situado el sensor, tal y como se aprecia en la Figura 4.

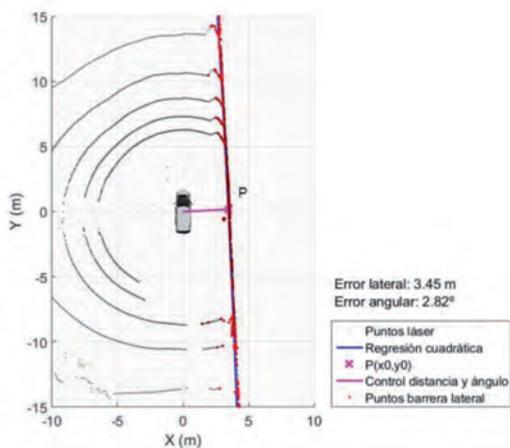


Fig. 4: Comportamiento algoritmo detección y cálculo de errores lateral y angular

Usando la ecuación de la recta tangente a la regresión que corta por el punto P (Ecuación 4), es posible calcular su pendiente con $m_t = f'(x_0)$.

$$y = f'(x_0) \cdot (x - x_0) + f(x_0) \quad (4)$$

A continuación, la pendiente de la recta perpendicular debe verificar que $m_n = -1/m_t$. Como esta recta debe cortar el punto (0, 0), localización del láser, es posible obtener el valor de (x_0, y_0) sustituyendo en la curva de regresión de los puntos seleccionados. Con este parámetro, es posible calcular los errores angulares y laterales dados por la Ecuación 5, siendo d la distancia que se pretende mantener con el elemento de referencia.

$$Error\ Lateral = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} - d \quad (5)$$

$$Error\ Angular = \text{asin}\left(\frac{y_0}{Error\ Lateral}\right)$$

3. RESULTADOS

Se han realizado dos pruebas con el fin de obtener los resultados del algoritmo de posicionamiento basado en láser. La primera prueba ha sido llevada a cabo en las instalaciones del INSIA, utilizando un circuito privado de 300 m y un vehículo autónomo basado en posicionamiento por GPS. En este caso, se ha configurado una ruta en paralelo a una pared recta de 150 m, tal y como se muestra en la Figura 5a. Con el fin de extender y generalizar estos

resultados, el sistema ha sido probado en un segundo conjunto de ensayos, pero, en este caso en condiciones reales. En concreto, las pruebas se han realizado en la autovía A-6 de Madrid, donde hay un acceso restringido a 16 km de carriles reversibles, abierto sólo para vehículos de alta ocupación y al transporte público (Bus-VAO). Este carril se separa del tráfico regular a través de barreras y sólo está abierta en las horas punta de tráfico. Este carril reversible cumple con los requisitos para la realización de la segunda prueba del sistema de posicionamiento basado en láser (Figura 5b). En los marcos de tiempo en que se cierra el carril Bus-VAO, la Dirección General de Tráfico Española (DGT) ha autorizado al INSIA para desarrollar experimentos que involucren la conducción autónoma y las tecnologías relacionadas. Durante los ensayos, el vehículo es conducido de forma manual, con el fin de no tener la posible influencia del controlador automático, ya que el objetivo de las pruebas es comparar las señales de control que proporcionarían los dos métodos de posicionamiento.

En ambos casos, el objetivo es comparar la información proporcionada por el receptor GPS y el láser para calcular el error angular y lateral de la trayectoria con el fin de verificar la fiabilidad de los datos láser frente a los del GPS para este fin, aún con buena cobertura de señal.

En el primer ensayo, el mapa de la trayectoria se ha obtenido utilizando un GPS diferencial con una precisión centimétrica, mientras que el vehículo es posicionado con un receptor GPS con corrección diferencial WAAS, con una precisión submétrica. La velocidad de circulación del vehículo ha sido de 20 km/h. En la Figura 6 se muestran los resultados de este ensayo controlado. Está representada la evolución de los errores laterales y angulares durante estas pruebas, calculados utilizando la información del receptor GPS y la información del LiDAR 3D. Se observa que la evolución durante el recorrido de ambos errores utilizando los dos sensores diferentes es equivalente, pero, en el caso de los GPS, estas magnitudes sufren un importante nivel de ruido en sus valores, causada por los errores de posicionamiento inherentes por la naturaleza del receptor GPS. En particular, el cálculo del error angular es especialmente ruidoso debido a la influencia de estos errores en el cálculo de la guiñada. Los valores obtenidos utilizando el láser 3D cuando se detecta la pared junto a la pista está sujeto a un bajo nivel de ruido, manteniendo los mismos niveles de precisión, incluso mejor que el GPS.

La segunda prueba consiste en un recorrido de 16 km que circulan por el carril derecho de la Bus-VAO a velocidades cercanas a 100 km/h para comparar la evolución de los errores laterales y angulares en función del sensor empleado para su cálculo. En este caso, el lá-



Fig. 5: a) Pista de pruebas de INSIA y ruta de referencia; b) Zona de pruebas en carril Bus-VAO de A6

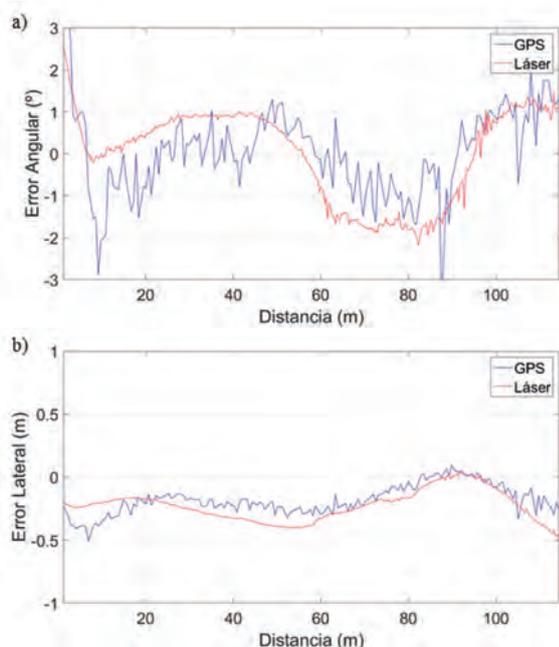


Fig. 6: Comparación de cálculo errores angulares (a) y laterales (b) en el entorno controlado de la pista de INSIA

ser detecta las barreras laterales de la vía de circulación. En la Figura 7 se muestran los resultados de un tramo de 600 metros con los dos sensores de adquisición de datos y el cálculo de error lateral y angular. En este caso, se trabaja con un receptor GPS con corrección diferencial nuevamente. Además de las conclusiones antes alcanzadas en el ensayo previo, también se puede observar otra limitación de los receptores GPS, ya que, en los puntos correspondientes a las distancias de 180 m y 500 m, la señal GPS se pierde debido a la circulación del vehículo bajo dos puentes que cruzan la carretera. Estas circunstancias, aparte de otras perturbaciones presentes a lo largo de la trayectoria, impiden disponer de precisión submétrica en todo punto con el receptor GPS. En este caso, el láser mantiene el posicionamiento y no se ve afectado por estos elementos.

La Tabla 1 muestra las desviaciones típicas de las señales de error angular y lateral para los dos ensayos. Se observa que, en todos los casos, éstas son menores en el caso de la detección me-

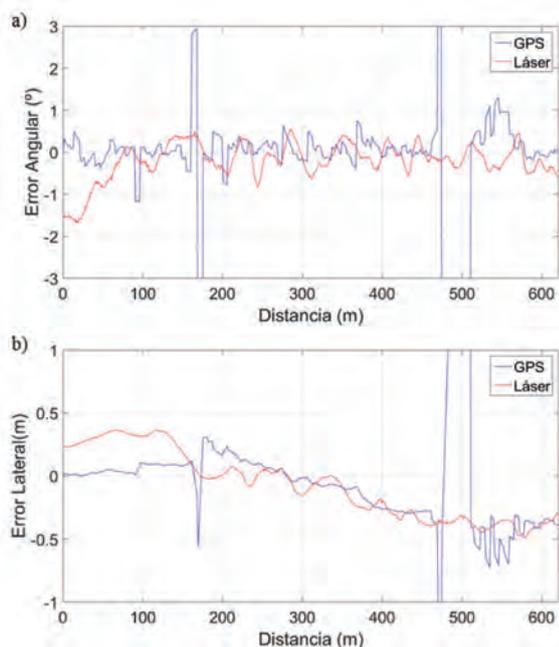


Fig. 7: Comparación de cálculo de los errores angulares (a) y laterales (b) en un segmento del carril bus VAO de la autovía A-6 de Madrid

dante el escáner láser que con el GPS lo que reafirma la conclusión cualitativa obtenida de las figuras anteriores. Además, al estudiar las componentes frecuenciales de las señales de error, se comprueba que, para las obtenidas a partir del láser 3D, dichas componentes se atenúan a niveles inferiores al 5% de su máximo ya por debajo de 1 Hz, mientras que las componentes de las señales obtenidas con el GPS no alcanzan ese nivel de atenuación ni para 5 Hz. Nótese que las componente de frecuencias bajas se pueden asociar a la forma de circular con el vehículo frente al elemento de referencia, siendo las componentes altas las debidas a las oscilaciones de los sistemas de posicionamiento.

	Error ANGULAR		Error LATERAL	
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 1	Ensayo 2
GPS	0,7659	1,4616	0,0609	0,3421
Láser	0,1921	0,0610	0,0141	0,1459

Tabla 1: Valores de desviaciones típicas (m) en las señales de error para el control del vehículo

Así, los resultados anteriores han demostrado que el sensor láser 3D se puede utilizar como sensor redundante para calcular la posición de un vehículo autónomo para su navegación, sin incurrir en los saltos que puede tenerse en una señal de un receptor GPS, por ejemplo al modificarse el número de satélites vistos. De esta forma, el LiDAR, utilizado generalmente para la detección de obstáculos, también se puede utilizar como elemento para el posicionamiento sin necesidad de añadir un nuevo sensor, con una exactitud aceptable para apoyar la navegación de vehículos autónomos y una robustez de respuesta superior a los receptores GPS, aún con correcciones diferenciales.

4. CONCLUSIÓN

El seguimiento de elementos de referencia ya se emplea para funciones automáticas en vehículos de carretera. Un ejemplo claro es el sistema de mantenimiento en el carril mediante visión artificial. Sin embargo, se ha presentado el desarrollo sobre tecnología LIDAR, más robusta ante cambios de iluminación y más versátil para proporcionar información de obstáculos durante la marcha con un coste computacional reducido.

En este artículo se presenta un método para apoyar la información de posicionamiento a partir de los datos suministrados por un láser 3D y que sirve de complemento al receptor GPS en los vehículos autónomos. Este método permite reutilizar la información espacial del sensor láser para una operación adicional detectando las barreras laterales o paredes de túneles, con el fin de complementar la información de navegación proporcionada por el GPS en situaciones en las que la cobertura de la señal es mala o la precisión del posicionamiento es baja, incluso si la señal no está disponible como en túneles. Este método se basa en un algoritmo que utiliza la nube de puntos suministrada por el LiDAR Velodyne VLP-16 para detectar y realizar un seguimiento de dichos elementos de referencia para calcular las dos variables principales de navegación para vehículos autónomos en esos entornos: el error lateral y angular. Este método ha sido comparado con el seguimiento GPS con el fin de estimar el grado de precisión y robustez de las mediciones. Las pruebas se han realizado, en primer lugar, en las instalaciones de INSIA con vehículos reales y posteriormente, circulando en tráfico cerrado por autovía a altas velocidades. Se ha demostrado que la información del escáner láser es suficiente para realizar el guiado de un vehículo autónomo que se mantenga en el carril. Es más, se comprueba en escenarios reales que este

tipo de guiado mediante LIDAR es más robusto y fiable que otras soluciones y funciona sin problemas donde otros sistemas dejan de proporcionar información o la proporcionan con baja calidad. Por ello, el guiado del vehículo autónomo de INSIA basado en la señal del láser ha sido implementado con resultados satisfactorios sobre los dos sitios de ensayo considerados.

Aunque los ensayos presentados se han realizado tomando como referencia muros laterales, ya que su detección y procesamiento implica la ejecución de todos los pasos del algoritmo, como se ha indicado anteriormente, el mismo método de guiado también podría emplearse para el seguimiento de las líneas que delimitan los carriles, aunque los pasos 2 al 4 del método se eliminarían. En este caso, la detección del elemento de referencia se basa en el contraste de reflectividad de la calzada y dichas líneas, contraste que es aún patente con cambios severos de iluminación. Como limitación en este caso se tiene la divergencia de los rayos emitidos por el escáner láser que hace que las líneas dejen de ser percibidas a distancias relativamente cercanas al vehículo. Tal limitación obliga a la estimación de la ecuación de la función del elemento de referencia en el Paso 6 utilizando puntos que el vehículo ya ha superado con el fin de aumentar la estabilidad de la estimación.

Cabe indicarse que este sensor empleado para el guiado sería el mismo que se emplearía para la detección de obstáculos en la trayectoria del vehículo autónomo, con lo que no se requiere equipamiento adicional y las dos funciones de navegación y evitación de colisiones se integran en el mismo dispositivo. Esta ventaja económica puede ser esencial para que se popularice este tipo de guiado en los vehículos autónomos, reduciéndose notablemente los requerimientos sobre los mapas electrónicos y los receptores GPS embarcados.

Por último, nótese que, al igual que se plantean algoritmos de fusión de información entre la señal GPS y los sensores inerciales para la reconstrucción de trayectorias, en este caso, se podría plantear una situación equivalente. Sin embargo, en este caso no es crítico, ya que, en la reconstrucción de la trayectoria, los sistemas inerciales presentan un error acumulativo que el GPS no tiene. En el caso que nos ocupa en este artículo, los cálculos de los parámetros de referencia no tienen ese error acumulativo ya que se calculan en cada punto. Por ello, la fusión en un sentido continuo no tiene sentido, más allá de comprobaciones para aumentar la robustez en caso de pérdidas de datos por malas recepciones por parte del láser.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Aranda MB. La Conducción automatizada. Sistemas de asistencia al conductor y de gestión inteligente del tráfico. Madrid: ASEPA. 2014. p. 175-189. ISBN: 978-84-941859-6-0

[2] Nashashibi F, Resende P, Charlot F, et al. "A cooperative personal automated transport system: A CityMobil demonstration in Rocquencourt". 2012 12th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV 2012. 2012. Vol. 2012. p. 644-649. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/ICARCV.2012.6485233>.

[3] Naranjo JE, González C, García R, et al. "Using Fuzzy Logic in Automated Vehicle Control". IEEE Intelligent Systems. 2007. Vol. 22. p. 36-45.

[4] Urmson C, Bak C, Dolan J, et al. "Autonomous Driving in Traffic: Boss and the Urban Challenge". Journal of Field Robotics. 2008. Vol. 22. p. 425-466.

[5] Nowakowski C, Shladover S, Lu XY, et al. "Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) for Truck Platooning: Operational Concept Alternatives". PATH Research Report. 2015. 37p.

[6] Broggi A, Medici P, Zani P, et al. "Autonomous vehicles control in the VisLab Intercontinental Autonomous Challenge". Annual Reviews in Control. 2012. Vol. 36. p. 161-171. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.arcontrol.2012.03.012>.

[7] Greenblatt NA, King JD. "Self driving cars and the law". IEEE Spectrum. 2016. Vol. 53. p. 46-51.

[8] Tokoro S, Kuroda K, Nagao T, et al. "Pre-crash sensor for pre-crash safety". Proceedings of International Conference on Enhanced Safety of Vehicles. Gothenburg, Sweden, 8-11 June. 2015.

[9] Polychronopoulos A, Tsogas M, Amditis AJ, et al. "Sensor fusion for predicting vehicles' path for collision avoidance systems". IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2007. Vol. 8. p. 549-562. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2007.903439>.

[10] Caraffi C, Cattani S, Grisleri P. "Off-road path and obstacle detection using decision networks and stereo vision". IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2007. Vol. 8. p. 607-618. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2007.908583>.

[11] Hernández-Aceituno J, Acosta L, Piñero JD. "Pedestrian Detection in Crowded Environments through Bayesian Prediction of Sequential Probability Matrices". Journal of Sensors. 2016. Vol. 2016.

[12] Guo J, Tsai M, Han J. "Automatic reconstruction of road surface features by using terrestrial mobile lidar". Automation in Construction. 2015. Vol. 58. p. 165-175. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2015.07.017>.

[13] García F, Jiménez F, Naranjo JE, et al. "Environment perception based on LIDAR sensors for real road applications". Robotica. 2011. Vol. 30. p. 185-193. doi: <http://dx.doi.org/10.1017/S0263574711000270>.

[14] Ramírez-Pedraza A, González-Barbosa JJ, Ornelas-Rodríguez, FJ, et al (2015). "Detección de Automóviles en Escenarios Urbanos Escaneados por un Lidar". Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, 2015. Vol. 12(2), p. 189-198. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2015.03.003>

[15] Tan J, Li J, An X, He H. "Robust Curb Detection with Fusion of 3D-Lidar and Camera Data". Sensors. 2014. Vol. 14. p. 9046-9073. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/s140509046>.

[16] Zhang X, Zhang A, Meng X. "Automatic fusion of hyperspectral images and laser scans using feature points". Journal of Sensors. 2015. Vol. 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/415361>.

[17] Jiménez F, Naranjo JE, Gómez Ó. "Autonomous collision avoidance system based on accurate knowledge of the vehicle surroundings". IET Intelligent Transport Systems. 2015. Vol. 9. p. 105-117. doi: <http://dx.doi.org/10.1049/iet-its.2013.0118>.

[18] Jiménez F, Naranjo JE, Gómez Ó, et al. "Vehicle tracking for an evasive manoeuvres assistant using low-cost ultrasonic sensors". Sensors. 2014. Vol. 14. p. 22689-22705. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/s141222689>.

[19] Jiménez F, Naranjo JE. "Improving the obstacle detection and identification algorithms of a laserscanner-based collision avoidance system". Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2011. Vol. 19. p. 658-672. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2010.11.001>.

[20] Guizzo E. "How Google 's Self Driving Car Works". IEEE Spectrum. 2011. p. 1-9.

[21] Naranjo JE, Jiménez F, Aparicio F, et al. "GPS and inertial systems for high precision positioning on Motorways". Journal of Navigation. 2009. Vol. 62. p. 351-363. doi: <http://dx.doi.org/10.1017/S0373463308005249>.

[22] Jiménez F, Naranjo JE, García F, et al. "Limitations of positioning systems for developing digital maps and locating vehicles according to the specifications of future driver assistance systems". IET Intelligent Transport Systems. 2011. Vol. 5. p. 60-69. doi: [10.1049/iet-its.2010.0042](http://dx.doi.org/10.1049/iet-its.2010.0042).

[23] Roth S, Singh S. "Application of robust, high-accuracy positioning for autonomous ground vehicles". AUVSI's Unmanned Systems North America 2004: Proceedings. 2004.

[24] Jiménez F, Naranjo JE, García F, et al. "Can low-cost road vehicles positioning systems fulfil accuracy specifications of new ADAS applications?". Journal of Navigation. 2011. Vol. 64. p. 251-264. doi: <http://dx.doi.org/10.1017/S0373463310000470>.

[25] Du X, Tan KK. "Vision-based approach towards lane line detection and vehicle localization". Machine Vision and Applications. 2015. Vol. 27. p. 175-191. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00138-015-0735-5>.

[26] De-La-Escalera A, Armingol JM, Pastor JM, et al. "Visual sign information extraction and identification by deformable models for intelligent vehicles". IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2004. Vol. 5. p. 57-68. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2004.828173>.

[27] Fernández C, Domínguez R, Fernández-Llorca D. "Autonomous navigation and obstacle avoidance of a micro-bus" International Journal of Advanced Robotic Systems. 2013. Vol. 10, p. 1-9. doi: <http://dx.doi.org/10.5772/56125>

[28] Broggi A, Bertozzi M, Fascioli A, et al. "The ARGO Autonomous Vehicle's Vision and Control Systems". International Journal of Intelligent Control and Systems. 1999. Vol. 3. p. 409-441.

[29] McDevitt CF. "Basics of Concrete Barriers". Public Roads. March/April 2000. Vol. 63.

[30] Ester M, Kriegel HP, Sander J, et al. "A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise". KDD-96 Proceedings. Portland, Oregon, USA, 2-4 August. 1996.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha recibido el apoyo del Ministerio de Economía y Competitividad (TRA2013-48314-C3-2-R), y la Comunidad de Madrid a través de la Red de Excelencia SEGVAUTO-TRIES.

Influence of the implementation of the European Higher Education Area on Engineering and Architecture university teachers

Influencia de la implantación del Espacio Europeo de Educación Superior en el profesorado universitario de Ingeniería y Arquitectura



Raúl Quevedo-Blasco and Gualberto Buela-Casal

Mind, Brain and Behavioral Research Center (CIMCYC). University of Granada. Campus de Cartuja, s/n - 18011 Granada (Spain). Tfno: +34 958 249 559

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8045> | Recibido: 02/05/2016 • Evaluado: 31/05/2016 • Aceptado: 28/08/2016

ABSTRACT

- When Spain joined the European Higher Education Area (EHEA) it implied the reorganization of curricula and led to a new education model. Due to the controversies arising from this adaptation the objective of the study is to find out the satisfaction of teachers towards this process. Participants were made up of 1,842 Engineering and Architecture teachers from Spanish public universities. A survey was used which was formulated ad hoc and made up of questions about the level of satisfaction on different aspects of the EHEA. In total, 55% have found it easy to adapt to the EHEA. However, 46% thought that measures were not being implemented correctly and 48% doubted that the reform is positive for the university. The implementation limitations detected and the possible solutions can be used as a guide to establish effective education policies which can help to improve teaching and research quality.
- **Keywords:** Higher Education, satisfaction, teachers, Engineering and Architecture.

RESUMEN

La adhesión al Espacio Europeo de Educación Superior (EEES) implicó en España una reorganización de los planes de estudio y el impulso de un nuevo paradigma educativo. Esta adaptación genera grandes controversias, por ello, el objetivo del estudio fue conocer la satisfacción del profesorado hacia este proceso. Los participantes fueron 1.842 profesores de Ingeniería y Arquitectura de universidades públicas españolas. Se les aplicó una encuesta elaborada ad hoc formada por preguntas sobre el grado de satisfacción hacia diferentes aspectos del EEES. Al 55% le ha resultado fácil adaptarse al EEES. Sin embargo, el 46% piensa que la aplicación de las medidas no se está desarrollando de forma correcta. Asimismo, el 48% tiene dudas de que la reforma sea positiva para la universidad. Las limitaciones de la implantación detectadas y las posibles soluciones que se revelan sirven de guía para el establecimiento de políticas educativas eficaces que ayuden a mejorar la calidad de la docencia y la investigación.

Palabras clave: Educación Superior, satisfacción, profesorado, Ingeniería y Arquitectura.

1. INTRODUCTION

The European Higher Education Area (EHEA) was created so that member countries would contribute to a knowledge-based

economy and improve their competitiveness. Its implementation in Spain has led to a reorganization of university teaching and the creation of a new education model, in which the student takes on a more active role. Degrees will now have a duration of four years, during which students must pass 240 ECTS (European Credit Transfer System), except in special cases, such as Architecture. According to Royal Decree 1393/2007 [1], in studies training for professional activities, curricula should be adapted to European regulations and guarantee the necessary competences in order to exercise the profession (such competences are prescribed by law, what makes these degrees have a large part of their structure laid down by the guidelines of the competent Ministry). In 2015, the Council of Ministers (at the proposal of the Ministerio de Educación, Cultura y Deporte), approved the Royal Decree 43/2015 [2], according to which the duration of the degrees is established from the 180 credits ECTS (3 years) to 240 credits ECTS (4 years) or even more, depending on the recognition of their professional duties. In this regard, the Conference of Rectors of Spanish Universities (*Conferencia de Rectores de Universidades Españolas*, CRUE), approved an extension in order not to apply the plan for university flexibility until September 2017, which allows to offer three-year degrees instead of the current four-year ones [3].

Besides this, the European Research Area (ERA) has been created in order to promote R+D cooperation between member states to improve collaboration between researchers, academics, engineers and technicians [4]. De Filippo, García-Zorita, Lascurain-Sánchez, Marugán, and Sanz-Casado [5] detected an increase in research productivity and a tendency amongst Spanish universities to internalize research. In fact, according to Purnell and Quevedo-Blasco [6] the publication of articles by Spanish researchers in international journals has increased. Specifically, they strive to publish in journals with a high impact factor in order to have a professional career and academic recognition [7]. However, although there are parameters to measure research quality and classifiers of research articles [8], there is still no reliable automatic system that can guarantee it [9]. An example is the h-index, which according to Hirsch and Buela-Casal [10] complements other more subjective indicators. Because of this, the quality of doctoral training must be guaranteed, as well as the mobility of students and teachers, which has led to the publication of studies regarding these aspects [11, 12].

With the emergence of competence-based learning [13], students not only have to acquire knowledge but also skills, attitudes and values. Therefore, teaching innovation experiences have been

implemented which are directed, amongst others, towards Engineering and Architecture students, through which students take on the leading role in their own learning through fieldwork [14] or through Electronic Learning (e-learning), that is, distance learning using electronic means [15], Blended Learning (b-learning), a methodology that combines traditional classroom learning with distance learning using virtual communication methods [16] and Mobile Learning (m-learning), in which persons study a subject remotely using their mobile phone [17,18]. We must not forget that both knowledge and innovation have a marked relationship with Spanish university research [19].

Casquero, Portillo, Ovelar, Benito, and Romo [20] consider that teaching in virtual environments allows students to control their learning process. There are other studies regarding the use of the Information and Communication Technologies (ICTs) by teachers [21], the analysis of competences [22], learning methodologies [23, 24] and assessment techniques in which implementation costs for the teacher are analyzed [25].

In order to adapt degrees to the EHEA not only has the mobilization of university managers been necessary, but the process also implies the effort and motivation of teachers [26]. One of the problems of the process is that teachers have no reference of any previous model in order to develop their role in the EHEA context [27]. This has led to controversy, and therefore, the objective of the study is to find out the satisfaction of teachers with this process. Although there is already a study regarding the satisfaction of Engineering students [28] towards the EHEA, it is necessary to look at the teachers' point of view regarding the process in order to detect the strengths and weaknesses of degree adaptation in the Engineering and Architecture field.

2. MATERIALS AND METHOD

2.1. PARTICIPANTS

In this investigation participants were made up of 1,842 teachers from Spanish public universities teaching in the Engineering and Architecture field. In total, 74% were male and 26% female, 60% being official teachers, and the majority, university lecturers (39%). The average age of those surveyed was 45 ($SD = 9$), they had been teaching for an average of 17 years ($SD = 9$) and the majority had not carried out a research period (40%). The five universities with the highest participation of teachers were the *Universidad Politécnica de Cataluña* (14%), *Universidad Politécnica de Madrid* (11%), *Universidad de Sevilla* (5%), *Universidad de Castilla-La Mancha* (5%) and the *Universidad de Valladolid* (4%).

2.2. INSTRUMENTS

- *Survey Regarding the Satisfaction of University Teachers with EHEA Adaptation*, made up of 65 mixed questions (with Likert scale and multiple-choice questions and a final open-ended one) divided into seven sections and a final section for comments and/or suggestions. These sections contained questions regarding the personal and professional details of teachers, aspects related to the modifications introduced by the EHEA, tasks, training and teacher coordination, teaching methodology as well as center organization and resources. The Cronbach alpha coefficient was analyzed in order to measure the reliability of the survey and it was 0.8 (same or similar to the value obtained in other studies [29, 30]). All the questions of the questionnaire (except the final question for comments and suggestions) were mandatory response

and, therefore, all the items (from 1 to 64) had a response rate of 100%. The last open-ended question (n° 65) was answered by the 45.71% of the teachers.

- *Database to record the e-mail addresses of the teachers.*
- *IT program used to create and send the survey.* This is a computer tool that allows to create surveys in an electronic format, to be sent by email, and then to record the answers (anonymously) from the people who answer the survey (see further information about the application procedure in the section).

2.3. DESIGN AND PROCEDURE

It is a population-based, descriptive study using a cross-sectional survey with a probability sample. The sample was selected with a confidence level of 97 % and an estimation error of 3%. In order to measure the satisfaction of the Engineering and Architecture teachers with the implementation of the EHEA, a survey was formulated *ad hoc* (based on the literature/legislation analyzed) and evaluated using the judgment of experts, with experience in teaching and in the adaptation process of degrees to the EHEA (in order to verify the suitability of either the thematic blocks or the questions). After the evaluation and following the recommendations of the experts, some items of the questionnaire were reformulated, but the same number of questions from the initial version was maintained (because of their suitability). Once this was done, the questionnaire was applied to a sample of 15 teachers with the goal of verifying the drafting of the questions and possible difficulties to answer them. It was checked that everything was correct and that the application was working properly. Selected teachers were invited to participate in the survey using an IT program and they were able to reply individually and anonymously, as each person had their own personal code. The limitation found out is that some teachers did not want to respond to all the questions and therefore they left the questionnaire incomplete, so such records could not be taken into account for the research.

3. RESULTS

3.1. GENERAL AND INSTITUTIONAL ASPECTS

In general, the Engineering and Architecture teachers have found it easy to adapt to the EHEA (55%), but 23% found it difficult, because they were not prepared for the change. In total, 46% thought that the measures were not being implemented correctly and 44% considered that there is room for improvement. Likewise, 48% doubted that the reform is positive for Spanish universities, followed by those that did not believe that it will obtain good results (31%). Besides this, 44% would prefer to return to the old system compared to 40% who would not. Information regarding the effort made by Engineering and Architecture teachers in subject planning and the priority given to each of their functions (teaching, research and administration) can be seen in Table 1. It also shows the level of satisfaction towards degree structure, the credit and qualification system, the European Diploma Supplement, teaching accreditation as well as the level of improvement in the quality of Higher Education with the EHEA.

Regarding Degree length, 39% of teachers opted for four years, followed by five (29%) and three years (28%). The length they considered ideal for an official research Master is two years (52%). With regard to the information received on an institutional level in order to help adapt the subjects taught to the EHEA, 41% of teachers maintained that they had received enough, compared

	Not at all	Little	Moderately	Quite	Very
Planning	2.1	6.7	23.7	43.8	23.4
Teaching	1	.9	6.2	25.3	66.4
Research	1.7	4.6	16.1	31.2	46.2
Administration	19.8	29.4	36.5	10.2	3.8
Structure	21.8	27.2	28.5	19.4	2.8
ECTS	12.4	20.5	32.1	28	6.7
Qualifications	13.5	21.8	32	27.6	4.8
EDS	11.2	13.8	32.4	28.8	13.6
Accreditation	17.2	21.4	33.1	22.3	5.8
Quality	26.7	32.3	26.3	13.1	1.3

Note. ECTS= European Credit Transfer System; EDS= European Diploma Supplement

Table 1: Percentage of Engineering and Architecture teachers according to their level of satisfaction towards aspects related to the EHEA

to 31% that had received little. Likewise, 57% stated that collaboration plans for EHEA adaptation had been implemented. The limitations noted by teachers can be seen in Appendix 1 (See supplementary material at the end of the paper).

3.2. TEACHING, RESEARCH AND ADMINISTRATION

In total, 50% of the group analyzed said that their lesson planning was quite well adjusted to the EHEA, followed by those who stated that it was moderately adjusted (22%) and very well adjusted (21%). Currently, teachers need more time to prepare classes (52%) than they did before the EHEA and 32% declared that they take more or less the same time. The level of effort needed to carry out teaching related tasks can be seen in Table 2.

In total, 58% of the teachers had a positive attitude towards the ERA, compared to 32% who had a negative vision. Besides, 46% would prefer to be able to dedicate more time to research, in accordance with the criteria set out by the Spanish National Agency for Quality Assessment and Accreditation (Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación, ANECA) to evalu-

ate scientific production, while 26% stated that they dedicate the same time to this task now as before the implementation of the EHEA. Regarding doctoral studies, 32% of teachers affirmed that they prefer the new structure (divided into a training period through a research Master and another period to carry out the doctoral thesis), compared to 27% who opted for the traditional Doctorate Programs, which had a teaching period and another one for research, being necessary a Research Competence diploma or an Advanced Studies Diploma (Diploma de Estudios Avanzados, DEA) in order to carry out the thesis. However, 19% said they did not have enough information in order to comment on the structure they consider appropriate.

With regard to the thesis format that they feel is more appropriate, 56% preferred the traditional format, while 31% preferred the collection of published scientific articles. In total, 49% of teachers thought that it is viable to carry out the thesis in three years depending on the field and 25 % believed that it is possible in all fields. However, 67% stated that there would not be an improvement in quality with the new doctoral studies (comprised of

	Not at all	Little	Moderately	Quite	Very
Acting as mediator	5.2	15.9	34.3	32.3	12.1
Theory classes	4.6	17.2	36.9	28.2	12.9
Practical classes	3.1	10.4	28.3	34.7	23.2
Seminars	8.7	15.5	34.9	28.7	11.8
Student supervision	4.8	14.3	28.2	31.9	20.5
Tutorials	6.3	20.2	35	24.7	13.7
Student assessment	3	8.1	23.6	31.9	33.2
Teaching coordination	3.9	10.6	30.7	31.6	23

Table 2: Percentage of Engineering and Architecture teachers according to the level of effort required for teaching functions

	Not at all	Little	Moderately	Quite	Very
Skills	1.7	7.9	28.1	44.6	17.4
Motivation	21.2	41.8	29.9	6.4	.4
Tutorials	7.7	60.2	22.1	8.2	1.6

Table 3: Percentage of Engineering and Architecture teachers according to the level of skill development, motivation and use of tutorials by students

a Master and the Doctoral Thesis). Likewise, 33% were indifferent to the creation of Doctoral Schools. Moreover, 57% would like to be able to dedicate more time to administration. The limitations noted by teachers in this section (regarding teaching and research) can be seen in Appendix 2 (See supplementary material at the end of the paper).

3.3. METHODOLOGY AND THE TEACHING AND LEARNING PROCESS

In total, 56% of teachers were in agreement with acting as a guide/mediator with their students, compared to 25% that were not. In fact, 55% of teachers stated that they were in favor of encouraging the active role of students. During classes 37% of Engineering and Architecture teachers declared that they would continue to offer master sessions. According to 50% of the teachers this methodology will not necessarily lead to an increase in teaching quality, although 36% thought that it will improve. In Table 3, it can be observed that approximately 45% of teachers stated that they develop their student's skills quite well, although student motivation to adopt an active role in class is low (42%) and besides, they do not go to tutorials very frequently (60%). With regard to doctoral training, 53% of teachers doubted that the current doctoral system guarantees the acquisition of skills by doctoral students, compared to 20% that believed that it does. Furthermore, 80% declared that they use ICTs (Information and Communication Technologies) on a regular basis in their classes. The requirements detected by teachers regarding methodology and the teaching and learning process can be observed in Appendix 3 (See supplementary material at the end of the paper).

3.4. EVALUATION

In total, 52% of Engineering and Architecture teachers found it easy to evaluate students' skills and 44% found it difficult. Furthermore, 63% declared that they carry out a continuous assessment in theory work and 85% in practical work, the rest of the teachers do it after finishing the subject. Besides, 36% showed a moderate satisfaction towards students' academic results, followed by 32% that felt quite satisfied and finally 20% indicated that they are not very satisfied with these results. If the results are compared with those from the previous system (three years to obtain a Diploma and five years to obtain a Degree [Licenciatura]), 36% of the teachers considered that they are practically the same, although 34% thought that grades were better before.

3.5. TRAINING

Of all the Engineering and Architecture teachers, 54% had adequate training in order to give classes in the EHEA context, although 39% acknowledged that it could be improved. Furthermore, 70% maintained that their university provides them with the necessary means to improve their training. Besides this, 95% defended lifelong learning and 45% of the teachers wanted to make use of the benefits of mobility by carrying out a stay abroad, compared to 35% that did not want to. The problems

found in teacher and student training can be seen in Appendix 4 (See supplementary material at the end of the paper).

3.6. COORDINATION, STUDENT ORGANIZATION AND RESOURCES

The coordination results are very balanced: 50% of the teachers stated that they maintain a high level of coordination with the rest of their department, while 46% said that they maintain little. In total, 65% declared that the ratio of students in the classroom has not been reduced in their center while 28% reported that it is being applied. With regard to the human resources observed by teachers in their center, 28% affirmed that there are enough, followed by those that thought there are some or little (26%). Regarding economic resources, the majority of teachers received very little (approximately 44%). Concerning materials and infrastructure, approximately 30% declared that there are some or little (see Table 4). The limitations observed by teachers concerning these aspects can also be seen in Appendix 5 (See supplementary material at the end of the paper).

4. DISCUSSION

In general, it has been easy for Engineering and Architecture teachers to adapt to the change, and although they expressed the difficulty they had faced in adapting their particular subject, half of the sample teachers stated that their teaching was quite well adjusted to the EHEA. Regarding satisfaction with degree structure (see e.g., [31]), there are very little differences between those that were moderately satisfied, and those that were moderately dissatisfied. Almost 40% opted for a four year degree length, although around 30% preferred a length of three or five years. In research Masters they chose a duration of two academic years. This duration fits within the stipulated for Master studies in the EHEA, as in Europe Master studies of less than 90 ECTS are not recognized and it is recommended that they are 120 [32].

With regard to doctoral training, the majority of Engineering and Architecture teachers considered that the new Postgraduate is more appropriate, but they are indifferent towards Doctoral Schools, probably due to a lack of awareness of their functions. Like the teachers from the study of Quevedo-Blasco and Buela-Casal [33] and the Science and Social/Legal teachers [29, 30], in the Engineering and Architecture field the doctoral thesis in its classic format is preferred. In fact, the majority did not consider it ideal for doctoral students to have publications before they defend their thesis (see [34]). Besides this, the Engineering and Architecture teachers thought it was viable to carry out the thesis in a period of three years depending on the area researched, despite the fact that, in the case of the Engineering thesis, the average duration is 5.5 years [35]. However, the Engineering and Architecture teachers did not believe that the new organization would necessarily imply an improvement in thesis quality and they doubted that the acquisition of skills by doctoral students is guaranteed.

Like the science teachers, the majority of Engineering and Architecture teachers would return to the traditional system [29].

	None	Little	Some	Quite a lot	A lot
Human	8	26	26	28	11.9
Economic	22.1	44.3	24.1	7.8	1.6
Materials/Infrastructure	10.3	30.1	30.2	24.5	4.7

Table 4: Percentage of Engineering and Architecture university teachers according to the human, economic and material/infrastructure resources received in their centre

Besides, they considered that it would have little effect on the quality of Higher Education, although the results are very even between those that thought it would not improve and those that believed that it would do so moderately. Teaching is the task with most priority for these teachers, more so than research and administration. However, the majority needs more time to prepare classes since the introduction of the EHEA and would like to be able to dedicate more time to research and less to administration.

Most of the group were in favor of the teaching and learning methodology in which the teacher acts as a guide/mediator and the student takes on a more active role, although to a lesser extent than the Social/Legal and Health and teachers [30, 36]. Nevertheless, there are teachers stated that master sessions would predominate in their classrooms. Likewise, 50% considered that this methodology would not improve learning quality, just like the Science teachers [29]

It is positive that almost all teachers defended lifelong learning, as they should serve as a role model for students and provide learning experiences that encourage students to continue learning throughout their lives [37]. However, 35% declared that they would not carry out a stay abroad, despite the fact that it is a quality indicator in the evaluation of university teachers. This could be due to reasons of compatibility with their work (as demonstrated in the open question), or a lack of financing. Although there was a gradual increase in the mobility of Spanish Teaching and Research Staff in the decade 1999-2009 [38], there are mobility differences between the EHEA countries, being a lot higher in Northern and Central European countries than the Mediterranean ones [12].

Concerning coordination, at least, the teachers maintained that there is a high level with the other members of their department, just like the Science teachers [29], although there is a large non-coordinated proportion. The teachers observed very few economic resources, and on the other hand, the majority perceived quite a lot of human resources, although with little differences between those that informed that there were few. Nor did the teachers think that there are enough material resources, an aspect that they emphasized in the open question. According to the latest data of the 2015 report "La Universidad Española en cifras-2013-14" of the Conference of Rectors of Spanish Universities-CRUE [39], the state spending on University has dropped back to figures of 2006 (representing a decrease of 11,8%). In this report, it is literally stated that "In Spain, the spending on I + D had dropped back in 2013 below the level corresponding to 2007" [39] p. 86). Besides, in recent years the number of students enrolled in this field has declined significantly [40].

Finally, some of the recommendations proposed by the Engineering and Architecture teachers in order to improve the development of the EHEA are: a) Carry out collaboration agreements with companies so that students can appreciate if degree contents adapt to work demands; b) Introduce an access exam for each specific degree so that the students that pass it are those with a high enough level to carry out their studies in the scheduled time; c) Before creating the degree offer it is necessary to discover the possible job prospects for graduates and the demand believed necessary on a national and international level; d) Control the work done by university teachers (absenteeism, little or no research, etc.), e) Improve teaching method training for university teachers and teacher training programs regarding EHEA matters should be compulsory, even for senior university teaching staff; f) Demand that universities present strategic teaching plans and promote their specialization in order to better use human and material resources; and g) In doctoral studies research transfer should

be valued more, and not only JCR publications, so that doctoral students have more opportunities to join companies, given that universities cannot currently accept them.

5. CONCLUSIONS

In this study the satisfaction of Engineering and Architecture teachers from Spanish public universities towards the EHEA has been evaluated. In all of these fields there is very little difference between those that thought the process could be improved and those that did not think the process is being developed correctly. The majority of Engineering and Architecture teachers believed that EHEA adaptation could be improved and that the changes would not be positive for the university.

Teachers stated that they are not qualified to teach in the EHEA and that they would need to receive further training. Accordingly, they have received quite a lot of institutional information regarding the process, there are collaboration plans with teaching staff and they are receiving the necessary means to improve. However, as detected in the open question, maybe the courses offered are not very useful and on occasion assistance is difficult, so it may call into question the quality of the training offered to university teachers.

In conclusion, it can be established that the Engineering and Architecture teachers are not completely satisfied with the way in which the EHEA adaptation has been carried out, although the limitations and possible solutions revealed could be used as a guide when establishing effective education policies to help in improving teaching and research quality, as well as enabling EHEA and ERA consolidation.

BIBLIOGRAPHY

- [1] Spain. Royal Decree 1393/2007, of 29 October, establishing the ordination of official university studies. Boletín Oficial del Estado, 30 October 2007, núm. 260. p. 44037-44048.
- [2] Spain. Royal Decree 43/2015, de 2 de febrero, por el que se modifica el Real Decreto 1393/2007, de 29 de octubre, por el que se establece la ordenación de las enseñanzas universitarias oficiales, y el Real Decreto 99/2011, de 28 de enero, por el que se regulan las enseñanzas oficiales de doctorado. Boletín Oficial del Estado, 2 February 2015, núm. 29. p. 8088-8091.
- [3] Los rectores acuerdan retrasar los cambios en la duración de las carreras [on line]. Periódico ABC. Madrid: Europa Press, March 2016 [June 16, 2016]. Available on Internet http://www.abc.es/sociedad/abci-rectores-ratifican-y-hacen-vinculante-moratoria-grados-3-anos-201603161340_noticia.html
- [4] Hoekman J, Frenken K, Tijssen RJW. "Research collaboration at a distance: Changing spatial patterns of scientific collaboration within Europe". Research Policy. June 2010. Vol. 39-5. p. 662-673. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.respol.2010.01.012>
- [5] De Filippo D, García-Zorita C, Lascrain-Sánchez ML, et al. "La actividad investigadora del sistema universitario español (2003-2012). Resultados del Observatorio IUNE (III Edición)". Revista Iberoamericana de Psicología y Salud. July-December 2014. Vol. 5-2. p.167-186.
- [6] Purnell PJ, Quevedo-Blasco R. "Benefits to the Spanish research community of regional content expansion in Web of Science". International Journal of Clinical and Health Psychology. May 2013. Vol. 13-2. p. 147-154. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1697-2600\(13\)70018-8](http://dx.doi.org/10.1016/S1697-2600(13)70018-8)
- [7] Fernández-Ríos L, Rodríguez-Díaz J. "The "impact factor style of thinking": A new theoretical framework". International Journal of Clinical and Health Psychology. May 2014. Vol. 14-2. p. 154-160. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1697-2600\(14\)70049-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1697-2600(14)70049-3)
- [8] Calvillo-Moreno E, Mendoza-Gonzalez R, Muñoz-Arteaga J, et al. "A bayesian classifier to search and classify research papers". DYNA New Technologies. January-December 2015. Vol. 2-1. p. 1-13. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT7657>
- [9] Olivás-Ávila JA, Musi-Lechuga B. "Validez y fiabilidad del Research ID y

- de "Web of Science" Production of Spanish Psychology". *International Journal of Clinical and Health Psychology*. January 2014. Vol. 14-1. p. 58-66. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1697-2600\(14\)70037-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1697-2600(14)70037-7)
- [10] Hirsch JE, Buela-Casal G. "The meaning of the h-index". *International Journal of Clinical and Health Psychology*. May 2014. Vol. 14-2. p. 161-164. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1697-2600\(14\)70050-X](http://dx.doi.org/10.1016/S1697-2600(14)70050-X)
- [11] Ariza T, Quevedo-Blasco R, Bermúdez, MP, et al. "Analysis of Postgraduate Programs in the EHEA and the U.S.A". *Revista de Psicodidáctica*. January-June 2013. Vol. 18-1. p. 197-219. DOI: <http://dx.doi.org/10.1387/RevPsicodidact.5511>
- [12] Kotsy F, Agiomirgianakis GM. "Mobility of higher education students in Europe: the south-north differences". *International Journal of Education Economics and Development*. 2013. Vol. 4-3. p. 233-254. DOI: <http://dx.doi.org/10.1504/IJEED.2013.056012>
- [13] Sarmentero-Bon I, Falcon-Acosta O, Torres-Lema M, et al. (2015). "Procedure for the formation through personal skills matrix". *DYNA Management*, January-December 2015. Vol. 3-1. p.1-10. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/MN7200>
- [14] Olmo JC, Delgado A, Pasadas M, et al. "Adquisición de competencias interdisciplinares en el Espacio Europeo de Educación Superior (E.E.S.): la expresión gráfica computacional en arquitectura, arte e ingeniería". In: Pasadas M (coord). *Actas de las I Jornadas sobre Innovación Docente y Adaptación al EEES en las titulaciones técnicas*. Granada: Ed. Godel Impresores Digitales S.L., 2010. p.195-198. ISBN: 978-84-92757-64-0
- [15] Redel-Macias MD, Castillo C, Aguilar Porro C, et al. "Development of a virtual tool for learning basic organisation and planning in rural engineering projects". *European Journal of Engineering Education*. 2014. Vol. 39-5. p. 507-517. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/03043797.2013.811473>
- [16] González AB, Rodríguez MJ, Olmos S, et al. "Experimental evaluation of the impact of b-learning methodologies on engineering students in Spain". *Computers in Human Behavior*. March 2013. Vol. 29-2. p. 370-377. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chb.2012.02.003>
- [17] Larruscain-Sarasola J, Rodríguez-Andara A. "M-Learning in vocational training: use and training needs among teachers". *DYNA New Technologies*. January-December 2015. Vol. 2-1. p. 1-18. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT7677>
- [18] Martín-Dorta N, Saorin JL, Contero M. "Web-based Spatial Training Using Handheld Touch Screen Devices". *Educational Technology Et Society*. 2011. Vol. 14-3. p. 163-177. DOI: <http://hdl.handle.net/10251/50509>
- [19] Cabeza-Pulles D, Fernandez-Perez V. "Knowledge and innovation: A study of their relationship in the spanish university research". *DYNA Management*. January-December 2015. Vol. 3-1. p.1-15. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/MN7475>
- [20] Casquero O, Portillo J, Ovelar R, et al. "iPLE Network: an integrated eLearning 2.0 architecture from a university's perspective". *Interactive Learning Environments*. September 2010. Vol. 18-3. p. 293-308. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10494820.2010.500553>
- [21] Guerra S, González N, García S. "Study on the Use of ICT as Teaching Tools by University Instructors. Comunicar". October 2010. Vol. XVIII. p.141-147. DOI: <http://dx.doi.org/10.3916/C35-2010-03-07>
- [22] Pérez FJ, Espinach FJ, Serrano A, et al. "Estudio de la tensión creativa en estudiantes de Ingeniería de dos universidades españolas". *Interciencia*. July 2011. Vol. 36-7. p. 524-530.
- [23] Gutiérrez-Braojos C, Salmerón-Pérez H, Muñoz-Cantero JM. "El efecto modulador de los patrones temporales sobre el logro en el aprendizaje autorregulado". *Revista de Psicodidáctica*. July-December 2014. Vol. 19-2 p. 267-287. DOI: <http://dx.doi.org/10.1387/RevPsicodidact.10066>
- [24] Santamaría J. "Aprendizaje autónomo en ingeniería: Un ejemplo práctico en Telemática". *Revista de Formación e Innovación Educativa Universitaria*. 2011. Vol. 4-2. p. 145-155.
- [25] Nistal ML. "An Experience of Continuous Assessment in Telecommunication Technologies Engineering: New Costs for the Teacher". *Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje*. May 2013. Vol. 8-2. p. 90-95. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/RITA.2013.2258225>
- [26] García-Berro E, Dapia F, Amblàs G, et al. "Estrategias e indicadores para la evaluación de la docencia en el marco del EEES". *Revista de Investigación en Educación*. January-December 2009. Vol. -6. 142-152.
- [27] Iglesias A, Moreno L, Jiménez J. "Supporting Teachers to Automatically Build Accessible Pedagogical Resources: The APEINTA Project. Technology Enhanced Learning". *Quality of Teaching and Educational Reform*. May 2010. Vol. 73- Communications in Computer and Information Science. p. 620-624. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-13166-0_86
- [28] Cantonnet ML, Berbegal J, Aldasoro JC. "Análisis de la adaptación al Espacio Europeo de Educación Superior (EEES) a través de las encuestas de satisfacción del alumnado". *Tendencias Pedagógicas*. 2013. Vol. -21. p. 119-132.
- [29] Quevedo-Blasco R, Ariza T, Buela-Casal G. "Evaluación de la satisfacción del profesorado de Ciencias con la adaptación al Espacio Europeo de Educación Superior". *Educación XX1*. January-June 2015. Vol. 18-1 p. 45-70. DOI: <http://dx.doi.org/10.5944/educxx1.18.1.12311>
- [30] Ariza T, Quevedo-Blasco R, Buela-Casal G. "Satisfaction of Social and Legal Sciences teachers with the introduction of the European Higher Education Area". *The European Journal of Psychology Applied to Legal Context*. January 2014. Vol. 6-1. p. 9-16. DOI: <http://dx.doi.org/10.5093/ejpalc2014a2>
- [31] Ramiro-Sánchez T, Buela-Casal G, Bermúdez MP. "University Qualification in Psychology in EHEA: Comparison Between Spanish Grado and Licenciatura Qualification". *Revista de Psicodidáctica*. January-June 2016. Vol. 21-1. p. 175-189. DOI: <http://dx.doi.org/10.1387/RevPsicodidact.13923>
- [32] Haug G. "Situación y perspectivas del EEES para la convergencia de postgrado y doctorado". Paper presented at the XI Foro Internacional sobre la Evaluación de la Calidad de la Investigación y de la Educación Superior-FECIES (Deusto-Spain, 8-10 July 2014).
- [33] Quevedo-Blasco R, Buela-Casal G. "Evaluación de tesis doctorales: Propuestas de mejora". *Revista Mexicana de Psicología*. January 2013. Vol. 30-1. p. 69-78.
- [34] Quevedo-Blasco R, Ariza T, Bermúdez MP, et al. "Actitudes del profesorado universitario español: formato de tesis doctorales, docencia e investigación". *Aula Abierta*. May-August 2013. Vol. 41-2. p. 5-12.
- [35] Dirección General de Política Universitaria. "Avances en el EEES y el EEI: El Nuevo Doctorado". Paper presented at the Jornadas sobre la Nueva Configuración del Doctorado en Europa (Basque Country-Spain, October 15, 2010).
- [36] Ariza T, Quevedo-Blasco R, Ramiro MT, et al. "Satisfaction of Health Science teachers with the convergence process of the European Higher Education Area". *International Journal of Clinical and Health Psychology*. September 2013. Vol. 13-3. p. 197-206. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1697-2600\(13\)70024-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1697-2600(13)70024-3)
- [37] Martínez-Mediano C, Lord SM. "Lifelong Learning Competencies Program for Engineers". *International Journal of Engineering Education*. January 2012. Vol. 28-1. p. 130-143.
- [38] Montané A, Beltrán J. [Coords.]. *Políticas de cohesión y equidad en la Educación Superior en España. Informe Nacional 2011*. Barcelona: Rede RIAIPE3, 2011. (Available in <http://roderic.uv.es/bitstream/handle/10550/23135/InformeNacionalModificado.pdf?sequence=3>)
- [39] Conference of Rectors of Spanish Universities-CRUE. *La Universidad Española en cifras. 2013-2014*. Madrid: CRUE, 2015. (Available in http://www.crue.org/Publicaciones/Documents/UEC/LA_UNIVERSIDAD_ESPANOLA_EN_CIFRAS_13-14.pdf).
- [40] Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. *Datos y cifras del sistema universitario español. Curso 2014-15*. Madrid, España: Secretaría General Técnica, 2015. (Available in <http://www.mecd.gob.es/dms/mecd/educacion-mecd/areas-educacion/universidades/estadisticas-informes/datos-cifras/Datos-y-Cifras-del-SUE-Curso-2014-2015.pdf>).

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Dirección General de Política Universitaria, under grant EA2011-0048. Ministerio de Educación. Government of Spain.

SUPPLEMENTARY MATERIAL

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/8045-1.pdf



Evaluación de la capacidad de aislamiento sísmico de apoyos convencionales de neopreno para puentes



Evaluation of the seismic isolation capacity of conventional bridge rubber bearings



Christopher Gutiérrez-Luna¹, Jesús Valdés-González¹, Carlos-Alberto González-Pérez²

Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ingeniería¹ y Facultad de Arquitectura y Diseño². Ciudad Universitaria. Cerro de Coatepec, s/n - 50130 Toluca. Estado de México (México). Tfn: +52 7222140855/414

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8034> | Recibido: 21/04/2016 • Evaluado: 25/04/2016 • Aceptado: 28/07/2016

ABSTRACT

- The dynamic response of conventional bridge rubber bearings is studied in this paper. The purpose is to assess the ability of seismic isolation of these bearings through the analysis of finite element models. Models with different lateral stiffness are subjected to different dynamic lateral loads (earthquake records, vibration tests and theoretical signals). The effectiveness of the rubber bearings is evaluated through quotients that relate the model response with the excitation. Two types of response are studied, maximum accelerations and Arias intensity. Additionally, hysteresis plots are obtained in order to estimate the dissipated energy by the bearings and the damping increasing or degradation. The obtained results are useful to make decisions concerning to the characteristics required for the conventional rubber bearings in order to increase their ability as seismic isolators and energy dissipation devices.
- **Keywords:** Rubber bearings, seismic isolation, vehicular bridges, energy dissipation.

RESUMEN

En este trabajo se estudia la respuesta dinámica de los apoyos convencionales de neopreno que se utilizan en puentes vehiculares. El propósito es valorar la capacidad de aislamiento sísmico de estos apoyos, por medio del análisis de modelos de elemento finito. Se estudian distintas rigideces laterales de los modelos, los cuales se someten a diferentes cargas dinámicas laterales (sismos, pruebas de vibración y señales teóricas). La efectividad de los apoyos de neopreno se calcula mediante cocientes que relacionan la excitación con la respuesta del modelo. Se estudian dos tipos de respuesta, aceleraciones máximas e intensidades de Arias. Adicionalmente, se obtienen curvas de histéresis que permiten evaluar la energía que disipan los apoyos, así como la degradación o incremento del amortiguamiento. Los resultados son útiles para tomar decisiones referentes a las características que deben tener los apoyos de neopreno para puentes, con el propósito de aumentar su capacidad de aislamiento sísmico y disipación de energía.

Palabras clave: Apoyos de neopreno, aislamiento sísmico, puentes vehiculares, disipación de energía.

1. INTRODUCCIÓN

Los sismos ocasionan grandes pérdidas debido a la falla estructural de las construcciones. Por ello, es importante contar con herramientas que minimicen sus efectos. Los aisladores de base son dispositivos de control que modifican la respuesta de las estructuras. Su propósito es aislar las estructuras del movimiento sísmico del suelo y disminuir las fuerzas de inercia que deben resistir, y con ello, posibles fallas estructurales.

Los aisladores se construyen con láminas de acero y neopreno intercaladas entre sí. Estos dispositivos se conocen como Aisladores Elastoméricos Reforzados con Acero (AERA). En algunos casos, llevan adicionalmente un núcleo de plomo que les proporciona mayor capacidad de disipación de energía. También hay aisladores en los cuales se ha sustituido el acero por fibras (carbón, vidrio, nylon y poliéster), lo cual ha mejorado su desempeño. A este tipo se les conoce como Aisladores Elastoméricos Reforzados con Fibras (AERF) [1].

Los aisladores se colocan entre la subestructura y la superestructura de los puentes y edificios. Su principal efecto es el incremento del periodo de vibración de la estructura, lo cual tiene como propósito alejarla de las zonas de mayor amplificación dinámica en los espectros de respuesta. Se busca que los aisladores tengan un comportamiento histerético a cortante que maximice la energía disipada. Las principales propiedades que determinan su efectividad son: el desplazamiento horizontal último que pueden alcanzar y su amortiguamiento. Ambos factores determinan la cantidad de energía que disipa el aislador. Tanto el amortiguamiento, como el desplazamiento último, dependen de las condiciones de apoyo del aislador (adherido o no), del material del refuerzo (acero o fibras) y de los esfuerzos vertical y horizontal que actúan sobre él [2]. Se ha observado que relaciones de carga axial actuante a resistente menores a 20% garantizan la falla por cortante del aislador y evitan su inestabilidad [3].

Los aisladores deben tener un comportamiento histerético estable, en el cual no haya degradación de rigidez, resistencia y amortiguamiento de un ciclo de carga a otro. Se ha observado que para desplazamientos horizontales del 10% al 100% de la altura total del aislador se presenta una degradación de rigidez, la cual es alta en los aisladores que no están adheridos en su base y baja en los que sí están [2]. En general, los apoyos elastoméricos que se utilizan como aisladores están sujetos a grandes deformaciones horizontales que se combinan con altas cargas axiales durante la

ocurrencia de sismos intensos. Por lo tanto, su diseño requiere una evaluación cuidadosa de su resistencia para esta combinación de cargas y desplazamientos que garantice su estabilidad [3,4].

Los apoyos convencionales de neopreno que se utilizan en la mayoría de los puentes simplemente apoyados, tienen como función principal absorber las deformaciones provocadas por los cambios de temperatura, las fuerzas de frenado y centrífuga que genere la carga viva, así como la vibración ambiental a que esté expuesto el puente [5]. En cuanto a su configuración y comportamiento, los apoyos convencionales de neopreno son parecidos a los aisladores de base AERA. Debido a ello, las primeras aplicaciones de aisladores sísmicos fueron en puentes.

Se ha estudiado experimentalmente el comportamiento dinámico y estático de los dos tipos de aisladores (AERA y AERF). En general, se ha observado que la rigidez vertical, el amortiguamiento, la disipación de energía y los máximos desplazamientos que alcanzan los AERF son mayores [6,7]. Por su parte, los AERA tienen mayor rigidez horizontal. En cuanto a degradación de rigidez y amortiguamiento, ambos tipos de aisladores presentan niveles similares [2].

En relación a los apoyos convencionales de neopreno para puentes, se ha observado [8,9] que estos apoyos funcionan como aisladores de base y provocan reducciones de la respuesta estructural que varían entre 35% y 80%, dependiendo del tipo de cargas que se apliquen en las pruebas.

En forma ideal, el estudio de los apoyos elastoméricos debe basarse en pruebas experimentales que permitan conocer su comportamiento. Sin embargo, los costos y el tiempo que se requiere para realizar estudios experimentales han limitado este enfoque. En los últimos años, se han desarrollado tecnologías de cómputo que permiten hacer análisis numéricos de modelos representativos de estructuras o componentes estructurales, cuyos resultados se aproximan a los experimentales. Por ejemplo, se han estudiado diferentes modelos de elemento finito representativos de aisladores tipo AERF [4,10-15], en los cuales se han analizado distintas condiciones y tipos de carga, configuraciones geométricas, condiciones de frontera *bonded* y *unbonded* (superficies de contacto)

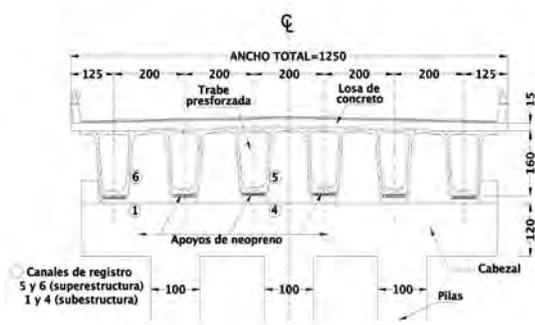
y propiedades de los materiales, entre otras. Dichos estudios han sido útiles para plantear procedimientos de diseño confiables para este tipo de aisladores.

En el presente trabajo, se estudian apoyos convencionales de neopreno de uso común en la mayoría de los puentes vehiculares simplemente apoyados. Aun cuando estos apoyos no se diseñan como aisladores sísmicos, es evidente que durante la ocurrencia de un sismo pudieran funcionar en algunos casos como ellos. De ahí la importancia de conocer su efectividad como aisladores. Para ello, se realiza el análisis tridimensional (3D) de distintos modelos representativos de este tipo de apoyos. Los modelos se someten a una carga vertical constante y a diferentes cargas laterales dinámicas. El comportamiento de los apoyos de neopreno se evalúa mediante la reducción de la respuesta sísmica del puente y la cantidad de energía que disipan.

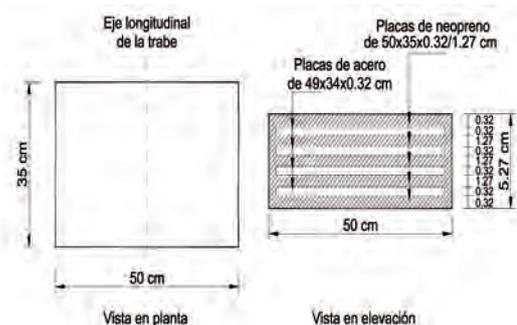
2. CASO DE ESTUDIO

Se analizan los apoyos de neopreno de un puente vehicular simplemente apoyado, el cual tiene 11 claros independientes de 35 m y un ancho de 12.50 m. La superestructura del puente está formada por 6 vigas de hormigón pretensado tipo cajón con aletas de 1.60 m de peralte y 2.00 m de ancho. Sobre las traveses se apoya una losa de hormigón reforzado de 15 cm de espesor. La subestructura está formada por un cabezal de hormigón sobre el cual se apoyan las traveses. A su vez, los cabezales se apoyan en pilas de hormigón reforzado que se desplantan desde una zapata que transmite las cargas al suelo mediante pilotes. En la Figura 1 se presentan la sección transversal del puente y las dimensiones de los apoyos de neopreno que se estudian.

Los apoyos del puente están formados por cuatro láminas de acero que actúan como refuerzo y cinco láminas de neopreno (Figura 1.b). En la formulación del modelo de elemento finito, se considera un neopreno dureza *Shore A60* con un módulo de elasticidad de 4.45 MPa y una deformación mínima a la ruptura de 400%, así como un acero cuyo módulo de elasticidad es de 2×10^{11} MPa con una relación de Poisson de 0.3.



a. Sección Transversal (acotaciones en cm)



b. Apoyo de neopreno



c. Imagen del puente

Figura 1: Detalles del puente en estudio

Los apoyos se diseñaron de acuerdo al método B para el diseño de apoyos elastoméricos reforzados con acero de las normas AASHTO [16].

3. ESTUDIO ANALÍTICO

Se elaboró un modelo de elemento finito representativo de los apoyos de neopreno. La base del modelo se restringió en los tres grados de libertad (x, y, z) y las fuerzas de excitación se aplicaron en su parte superior. El análisis se realizó bajo la acción simultánea de una carga axial constante de 443.41 kN que representó la reacción de la trabe debida al peso de la superestructura y una fuerza lateral dinámica. Se estudiaron diferentes cargas dinámicas correspondientes a sismos registrados en distintos tipos de terreno, señales teóricas y fuerzas armónicas aplicadas al puente durante pruebas de vibración [9].

El modelo se dividió en 66 elementos finitos del tipo prisma rectangular, los cuales tienen 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo. En la parte superior e inferior del modelo se colocaron placas de rigidez infinita que representaron a la superestructura y a la subestructura del puente, respectivamente. Para tomar en cuenta la interacción entre dos superficies (láminas de acero y neopreno), se utilizaron elementos de contacto que permiten modelar el deslizamiento que se puede presentar entre las superficies. Las condiciones de contacto se definieron como *bonded*, lo cual implica una adhesión completa entre las superficies de las placas interconectadas [17] debida al proceso de vulcanizado. Las uniones del apoyo con la subestructura y la superestructura del puente también se consideraron con elementos de contacto *bonded*. En este caso, la adherencia entre las superficies del apoyo y el puente se debe a la fricción que se produce por la carga vertical.

3.1. MODELO DEL NEOPRENO

El neopreno es un material *hiperelástico* que tiene un comportamiento no lineal, lo que significa que su respuesta ante la carga aplicada no es directamente proporcional a la deformación [18]. Existen distintos modelos para representar el comportamiento del neopreno, en este caso, se utilizó el modelo de Ogden de tercer orden, el cual se ha utilizado en diversos trabajos [14, 15]. La ecuación (1) corresponde a dicho modelo [17, 19].

$$W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{r=1}^N \frac{\mu_r}{\alpha_r} (\lambda_1^{\alpha_r} \lambda_2^{\alpha_r} \lambda_3^{\alpha_r} - 3) \quad (1)$$

donde W es la función de la energía de deformación, λ_1, λ_2 y λ_3 son las relaciones principales de estiramiento y N, α_r y μ_r son constantes del material. Los valores considerados para las constantes fueron

$$\begin{array}{lll} \mu_1 = 6.18 \times 10^5 \text{ Pa} & \mu_2 = 1180 \text{ Pa} & \mu_3 = -9810 \text{ Pa} \\ \alpha_1 = 1.3 & \alpha_2 = 5 & \alpha_3 = -2 \end{array}$$

La deformación permisible a corte de los aisladores γ_w [20] se puede estimar como una fracción de la deformación de falla del hule a tensión pura ϵ_v , tal que

$$\gamma_w \approx 0.7 \epsilon_v \quad (2)$$

$$\epsilon_v = e \delta \quad (3)$$

donde γ_w es la deformación permisible a corte, ϵ_v es la deformación de falla del hule en tensión pura, e es el espesor de las

láminas de neopreno y δ es el porcentaje de deformación mínima de rotura.

De acuerdo con la geometría del apoyo de neopreno que se estudia y con base en las ecuaciones (2) y (3), la deformación permisible a corte resulta $\gamma_w = 12.46$ cm, la cual es independiente de la rigidez lateral del apoyo. En este trabajo, se asumió que dicha deformación es la máxima que podían alcanzar los apoyos del puente.

3.2. SEÑALES QUE SE ESTUDIAN

Las señales utilizadas para excitar los modelos, correspondieron a: 1) sismos reales registrados en terreno duro y blando, 2) señales teóricas y 3) señales obtenidas en pruebas de vibración forzada realizadas en el puente que se estudia [9]. Por lo que se refiere a las señales sísmicas, se consideraron los registros correspondientes al sismo de Michoacán, México del 19 de septiembre de 1985 ($M_w = 8.1$). En particular, se analizaron los registros de las estaciones de Caleta, Ciudad Universitaria (CU) y Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). La estación de Caleta (terreno duro) se localiza en la zona cercana al epicentro del temblor, mientras que las estaciones de CU (terreno duro) y SCT (terreno blando) se localizan en la Ciudad de México a más de 400 km de la zona epicentral. Dichos registros tienen periodos predominantes del suelo de $T_s = 0.5$ s, aproximadamente, para Caleta y CU y de $T_s = 2$ s para SCT.

Por lo que se refiere a las señales teóricas, se utilizaron dos señales armónicas de tipo senoidal con amplitud constante y periodos de $T_{ST} = 0.5$ s y $T_{ST} = 2$ s, las cuales se supone que son representativas del movimiento sísmico del suelo en terreno duro y blando, respectivamente.

Adicionalmente, se analizaron dos señales obtenidas durante pruebas de vibración forzada llevadas a cabo en el puente [9]. Durante estas pruebas se sometió la superestructura del puente a cargas laterales armónicas mediante un excitador de masas excéntricas y se registraron las aceleraciones en la superestructura y la subestructura. Las señales que se estudiaron correspondieron a las pruebas en las cuales las cargas aplicadas al puente tuvieron periodos de $T_{SE} = 0.5$ s y $T_{SE} = 1$ s.

En la Figura 2 se muestran algunas de las señales correspondientes a los sismos y a las pruebas de vibración que se utilizaron como excitación en los modelos.

4. RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados de los distintos modelos de elemento finito que se estudiaron. Los resultados se presentan por separado para cada tipo de carga dinámica (sismos, señales teóricas y pruebas experimentales).

Con el propósito de estudiar más casos, se modificó la rigidez lateral del modelo original, de tal forma que se alcanzaran distintos periodos de vibración para el apoyo de neopreno. En total se generaron 9 modelos diferentes de elemento finito, cuya rigidez respecto al modelo original varió desde -80% (disminución) hasta 60% (aumento). De esta forma, se analizaron modelos cuyo periodo fundamental de traslación varió entre $T = 3.04$ s y $T = 0.35$ s. El modelo original, cuyas características corresponden a los apoyos del puente en estudio, se identifica como modelo 6 ($T = 0.56$ s).

En todos los análisis el apoyo de neopreno se llevó hasta la falla, es decir, que alcanzó una deformación horizontal máxima cercana a 12.46 cm. Para lograrlo, las fuerzas dinámicas se escalaron de tal forma que la deformación máxima del apoyo fuera cercana a dicho valor. Como resultado de los análisis no lineales, se obtuvieron his-

torias en el tiempo de desplazamientos y aceleraciones medidas en la parte superior del modelo. A partir de estos resultados se evaluó la efectividad de cada modelo como aislador de base.

Se utilizaron dos parámetros de respuesta para valorar la capacidad de aislamiento del apoyo. Uno fue el cociente de la máxima aceleración de la respuesta dinámica del apoyo (A_r) dividida entre la máxima aceleración de la excitación (A_e), es decir A_r/A_e . (Ambas aceleraciones corresponden a la fase estable de la vibración). El otro parámetro fue el cociente de las intensidades de Arias calculadas a partir de los registros de aceleraciones de la respuesta y la excitación I_r/I_e . La intensidad de Arias se calcula por medio de la ecuación (3) y es un parámetro que permite valorar la cantidad de energía que contiene un registro en determinado lapso de tiempo [21].

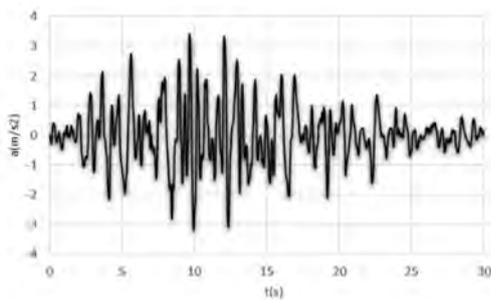
$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_d} a^2(t) dt \quad (4)$$

donde g es la aceleración de la gravedad, $a(t)$ es la aceleración de la señal que se analiza y t_d es el tiempo total que dura el movimiento.

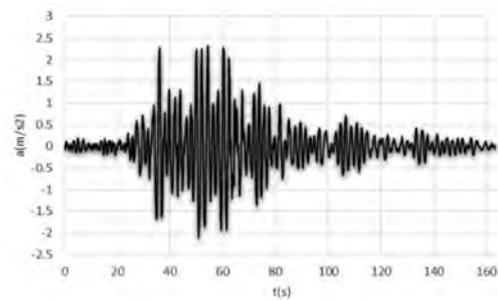
Un valor menor a 1 para estos cocientes de aceleraciones e intensidades de Arias, significa que el apoyo funciona como aislador, ya que la respuesta es menor que la excitación (entrada).

4.1. MODELOS SOMETIDOS AL SISMO DE 1985 REGISTRADO EN LAS ESTACIONES DE CALETA, CU Y SCT

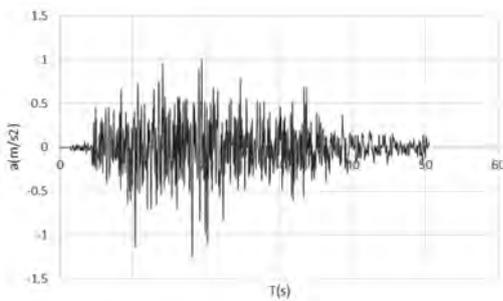
En la Tabla 1 se presentan los resultados de los casos en los cuales los modelos de elemento finito se sometieron a señales sísmicas. Las señales que se estudian corresponden a los registros del temblor de Michoacán, México de 1985 ($M_w=8.1$) registrado en las estaciones de Caleta, CU y SCT. En las columnas 1 a 3 de la Tabla 1 se muestran, la identificación del modelo, el porcentaje en que se disminuyó o aumentó su rigidez respecto a la original y su periodo fundamental de vibración en la dirección de análisis, respectivamente. En las columnas 4 a 6 se muestran los resultados del cociente de aceleraciones máximas para cada una de las señales que se estudian y en las columnas 7 a 9 los cocientes de las intensidades de Arias. De acuerdo a lo que se comenta en párrafos anteriores, los cocientes se calculan dividiendo la respuesta entre la entrada, por lo que un valor menor a 1 del cociente significa que el apoyo trabaja como aislador.



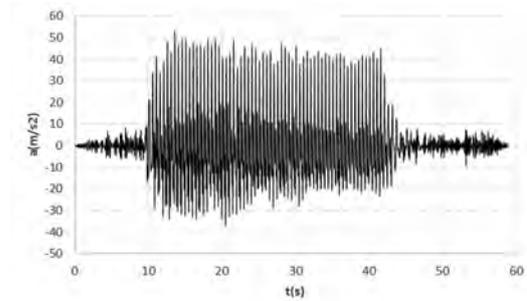
a) Acelerograma estación CU (terreno duro)



b) Acelerograma estación SCT (terreno blando)

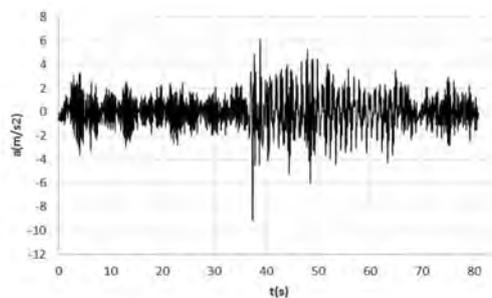


c) Acelerograma estación Caleta



d) Prueba de vibración con periodo de excitación

$$T_{SE} = 0.5 s$$



e) Prueba de vibración con periodo de excitación $T_{SE} = 1 s$

Figura 2: Señales de aceleraciones aplicadas a los modelos como excitación

Modelo	Rigidez	Periodo (s)	Ar/Ae			Ir/Ie		
			Caleta	CU	SCT	Caleta	CU	SCT
1	-80%	3.04	0.83	1.03	1.29	0.69	1.07	1.42
2	-70%	1.91	0.80	0.90	1.51	0.68	1.23	2.15
3	-60%	1.41	0.81	0.95	1.96	0.76	1.12	4.00
4	-40%	0.93	0.80	1.25	1.68	0.86	1.64	4.50
5	-20%	0.70	0.88	1.30	0.87	0.78	2.31	0.84
6	Original	0.56	0.90	1.33	0.62	0.85	2.61	0.35
7	+20%	0.44	1.06	1.34	0.64	0.99	2.97	0.25
8	+40%	0.40	1.00	1.63	0.55	1.02	2.10	0.18
9	+60%	0.35	1.03	1.72	0.60	1.19	1.98	0.15

Tabla 1: Cocientes de aceleraciones e intensidades de Arias para los casos en que se estudian los registros sísmicos de CALETA, CU y SCT

Modelo	Rigidez	Periodo (s)	Ar/Ae		Ir/Ie	
			Teórica $T_{ST} = 0.5$ s	Teórica $T_{ST} = 2$ s	Teórica $T_{ST} = 0.5$ s	Teórica $T_{ST} = 2$ s
1	-80%	3.04	1.11	1.02	1.05	0.83
2	-70%	1.91	1.03	1.06	0.82	1.12
3	-60%	1.41	1.03	1.13	0.93	1.27
4	-40%	0.93	1.05	1.35	1.01	1.79
5	-20%	0.70	1.09	1.66	1.13	2.84
6	Original	0.56	1.18	2.26	1.32	5.39
7	+20%	0.44	1.30	2.51	1.59	4.91
8	+40%	0.40	1.37	2.46	1.91	2.96
9	+60%	0.35	1.57	2.27	2.50	1.09

Tabla 2: Cocientes de aceleraciones e intensidades de Arias para los casos en que se estudian señales teóricas senoidales con periodos $T_{ST} = 0.5$ s y $T_{ST} = 2$ s

Modelo	Rigidez	Periodo (s)	Ar/Ae		Ir/Ie	
			Teórica $T_{SE} = 0.5$ s	Teórica $T_{SE} = 1$ s	Teórica $T_{SE} = 0.5$ s	Teórica $T_{SE} = 1$ s
1	-80%	3.04	0.69	0.70	0.71	0.80
2	-70%	1.91	0.63	0.66	0.56	0.73
3	-60%	1.41	0.65	0.70	0.62	0.74
4	-40%	0.93	0.66	0.81	0.64	0.84
5	-20%	0.70	0.69	0.92	0.68	0.97
6	Original	0.56	0.71	0.98	0.74	0.93
7	+20%	0.44	0.75	0.99	0.85	0.96
8	+40%	0.40	0.80	0.98	0.97	0.97
9	+60%	0.35	0.88	0.87	0.93	0.96

Tabla 3: Cocientes de aceleraciones e intensidades de Arias para los casos en que se estudian señales obtenidas en pruebas experimentales con periodos $T_{SE} = 0.5$ s y $T_{SE} = 1$ s

4.2. MODELOS SOMETIDOS A LAS SEÑALES TEÓRICAS SENOIDALES CON PERIODOS $T_{ST} = 0.5$ s Y $T_{ST} = 2$ s

En esta sección (Tabla 2) se muestran los resultados de los casos en los cuales los modelos se someten a excitaciones senoidales con periodos $T_{ST} = 0.5$ s y 2 s. El orden en que se presentan los resultados en la Tabla 2 es el mismo que se comentó para la Tabla 1, aunque en este caso sólo se tienen dos columnas que muestran los resultados para los cocientes de aceleraciones (columnas 4 y 5) e intensidades de Arias (columnas 6 y 7).

4.3. MODELOS SOMETIDOS A LAS SEÑALES OBTENIDAS EN PRUEBAS DE VIBRACIÓN CON PERIODOS DE EXCITACIÓN $T_{SE} = 0.5$ s Y $T_{SE} = 1$ s

En la Tabla 3 se muestran los resultados correspondientes a los cocientes de aceleraciones e intensidades de Arias (respuesta/excitación), que se calcularon a partir de los análisis en los cuales los modelos se sometieron a señales obtenidas en pruebas experimentales. Estas pruebas se llevaron a cabo en el puente que se estudia y las fuerzas dinámicas que se aplicaron tuvieron periodos de $T_{SE} = 0.5$ s y $T_{SE} = 1$ s. El orden de las columnas de la Tabla 3 es el mismo que se comenta para las Tablas 1 y 2.

4.4. RESULTADOS DE HISTÉRESIS

Se presentan las curvas de histéresis para dos señales teóricas de amplitud creciente con periodos de $T_{ST} = 0.5$ s y $T_{ST} = 2$ s. Las señales tienen 30 ciclos. El análisis sólo considera algunos ciclos del comportamiento histérico del modelo original ($T = 0.56$ s), los cuales corresponden a distintos niveles de deformación del apoyo que van desde pequeñas deformaciones, hasta deformaciones cercanas a la falla. A partir de este análisis, se evalúan el desplazamiento, la rigidez horizontal efectiva, el amortiguamiento y la energía disipada del modelo.

La rigidez efectiva se define como [15]

$$K_{efec}^h = \frac{F_{m\acute{a}x} - F_{m\acute{i}n}}{d_{m\acute{a}x} - d_{m\acute{i}n}} \quad (4)$$

donde, $F_{m\acute{a}x}$ y $F_{m\acute{i}n}$ son los valores máximo y mínimo de la fuerza de corte y $d_{m\acute{a}x}$ y $d_{m\acute{i}n}$ el máximo y mínimo desplazamiento.

La relación de amortiguamiento viscoso se obtiene a partir de la ecuación (5), la cual depende de la energía contenida en el lazo de histéresis W_d y de la energía elástica W_e .

$$\beta = \frac{W_d}{4\pi W_s} \tag{5}$$

= 2 s (21497.98 J). Se aprecia que la energía que disipa el apoyo de neopreno depende de forma importante de las características de la excitación.

$$W_s = \frac{K_{efec}^h (\Delta_{m\acute{a}x})^2}{2} \tag{6}$$

$\Delta_{m\acute{a}x}$ es el promedio de los desplazamientos máximo y mínimo

$$\Delta_{m\acute{a}x} = \frac{d_{m\acute{a}x} + d_{m\acute{i}n}}{2} \tag{7}$$

Los ciclos de histéresis son una forma de medir la energía que disipa el apoyo, el área encerrada en cada lazo representa la energía disipada en cada ciclo. En la Figura 3 se muestran las curvas de histéresis que corresponden a los casos en los que el modelo original se somete a señales teóricas con $T_{ST} = 0.5$ s y $T_{ST} = 2$ s.

La energía histerética que disipa el apoyo de neopreno corresponde a la suma de la energía histerética de los 30 ciclos de que consta cada señal. En este caso, la energía histerética se calculó para 4 ciclos representativos del conjunto. En la Tabla 4 se presentan los resultados. De izquierda a derecha se muestran, el ciclo, el desplazamiento máximo del apoyo, la rigidez horizontal efectiva, la energía disipada y el amortiguamiento para ese ciclo.

Resulta que la suma de la energía disipada durante los 4 ciclos que se analizan para la señal con $T_{ST} = 0.5$ s (88303.09 J), es prácticamente cuatro veces la que se disipa para la señal con T_{ST}

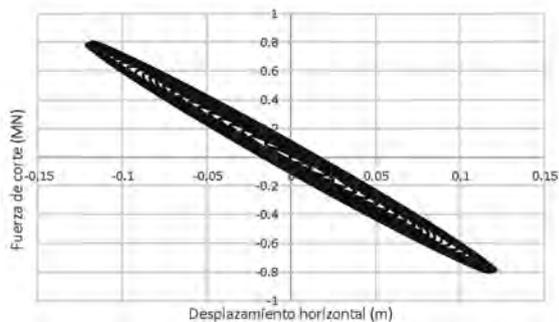
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Figura 4 se muestran las gráficas con los cocientes (respuesta/excitación) que se presentan en las Tablas 1, 2 y 3 de la sección anterior. En el eje horizontal de las gráficas se muestra la identificación de los modelos junto con sus periodos de vibración, y en el eje vertical los cocientes resultantes. Cocientes menores a 1 indican que la respuesta disminuye en relación a la excitación, es decir, que el apoyo trabaja como aislador.

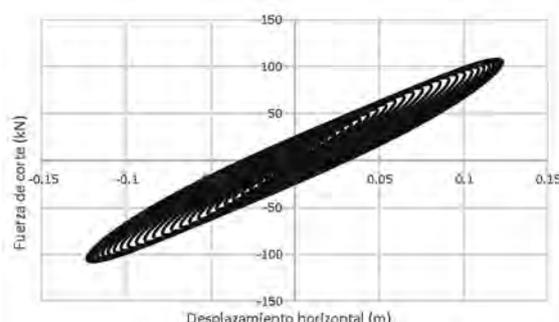
Para los sismos (Tabla 1, Figuras 4a,b), se observa que los modelos tienen mejor desempeño como aisladores para el registro de Caleta. En este caso, 6 modelos con periodos ≥ 0.56 s presentan cocientes menores a 1, tanto para las aceleraciones máximas, como para las intensidades de Arias. Por otra parte, los mayores cocientes de aceleraciones máximas e intensidades de Arias resultan de 1.03 y 1.19, respectivamente, y los menores de 0.8 y 0.68.

Cuando se analizan los resultados para el registro de CU, se observa que sólo en los modelos 2 ($T = 1.91$ s) y 3 ($T = 1.41$ s), el cociente de aceleraciones máximas es menor que 1. Para las intensidades de Arias, en ningún modelo el cociente es menor a 1. Para este registro, los mayores cocientes de aceleraciones máximas e intensidades de Arias resultan de 1.72 y 2.97, respectivamente, y los menores de 0.9 y 1.07.

Para el registro de SCT, se observa que 5 de los modelos cuyos periodos son ≤ 0.7 s trabajan como aisladores para ambos tipos



a) Fuerza vs desplazamiento para $T_{ST} = 0.5$ s

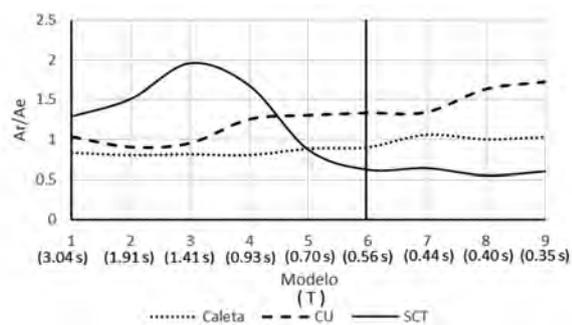


b) Fuerza vs desplazamiento para $T_{ST} = 2$ s

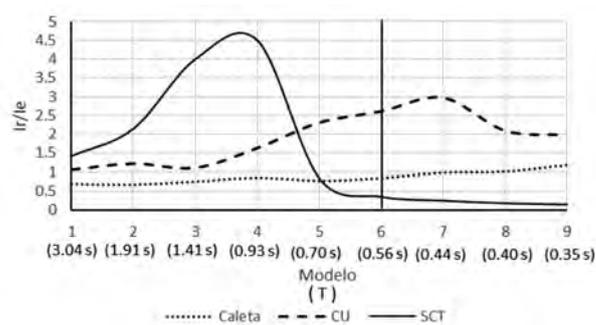
Figura 3: Curvas de histéresis para las señales con $T_{ST} = 0.5$ s y $T_{ST} = 2$ s

Propiedades del apoyo de neopreno para la señal teórica con $T_{ST} = 0.5$ s				
Ciclo	Desplazamiento (cm)	Rigidez horizontal efectiva (N/m)	Energía disipada (W_d) (J)	Amortiguamiento () (%)
A	5.5	6,449,255.83	9,433.6	7.59
B	8.7	6,967,324.80	17,632.83	5.21
C	11.3	6,748,652.18	29,863.86	5.51
D	12.1	6,514,593.09	31,372.80	5.23
Total de energía disipada =			88,303.09	
Propiedades del apoyo de neopreno para la señal teórica con $T_{ST} = 2$ s				
	Desplazamiento (cm)	Rigidez horizontal efectiva (N/m)	Energía disipada (W_d) (J)	Amortiguamiento () (%)
A	3.7	1,167,044.59	898.62	8.49
B	7.5	1,038,068.48	3,329.25	8.98
C	10.85	932,743.07	7,730.11	11.18
D	12.35	896,176.15	9,540.00	11.09
Total de energía disipada =			21,497.98	

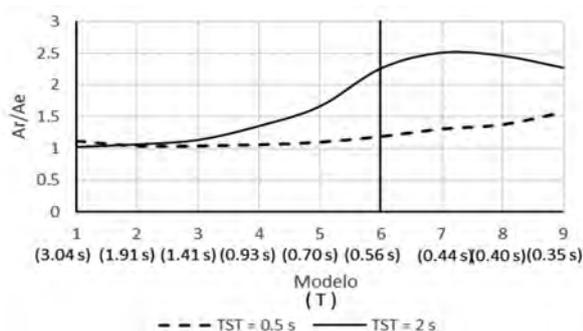
Tabla 4: Propiedades histeréticas del apoyo de neopreno original sometido a dos excitaciones teóricas ($T_{ST} = 0.5$ s y 2 s)



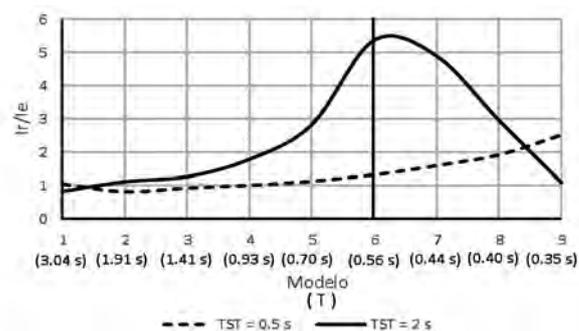
a) Cocientes de aceleraciones para sismos



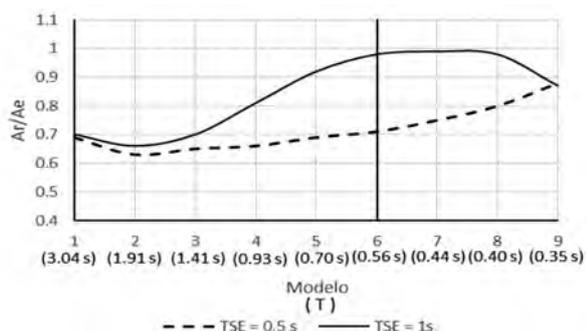
b) Cociente de intensidad de Arias para sismos



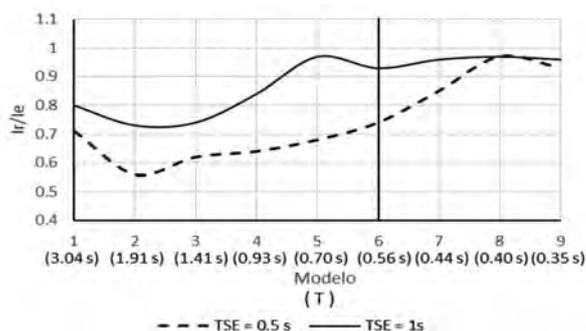
c) Cociente de aceleraciones para señales teóricas



d) Cociente de intensidad de Arias para señales teóricas



e) Cocientes de aceleraciones para pruebas de vibración



f) Cocientes de intensidad de Arias para pruebas de vibración

Figura 4: Cocientes de aceleraciones e intensidades de Arias para las señales que se analizan

de respuesta (cocientes menores a 1). En este caso, los mayores cocientes de aceleraciones máximas e intensidades de Arias resultan de 1.96 y 4.50, respectivamente, mientras que los menores de 0.55 y 0.15.

Cuando los modelos se someten a señales teóricas senoidales (Tabla 2, Figuras 4c,d), ningún modelo se comporta como aislador para el caso de máximas aceleraciones. Mientras que para las intensidades de Arias, sólo el modelo 1 para la señal con $T_{ST} = 2$ s, y los modelos 2 y 3 para la señal con $T_{ST} = 0.5$ s, trabajan como aisladores. Esto se explica en la medida que la respuesta inelástica de osciladores sometidos a señales teóricas de este tipo, tienen un comportamiento de constante crecimiento de la respuesta conforme aumenta su periodo. Mientras que para el caso de señales sísmicas, la respuesta inelástica de los osciladores encuentra determinadas etapas en donde a mayor periodo del oscilador se estabiliza la respuesta, e incluso puede llegar a disminuir. Esto justifica que ante señales sísmicas algunos modelos se comporten como aisladores de base, mientras que para señales teóricas, prácticamente ninguno lo hace.

Todos los modelos sometidos a las excitaciones utilizadas en las pruebas de vibración (Tabla 3, Figuras 4e,f), trabajan como ais-

ladores sísmicos. Los cocientes de aceleraciones máximas varían de 0.63 a 0.88 para la señal con $T_{SE} = 0.5$ s y de 0.66 a 0.99 para la señal con $T_{SE} = 1.0$ s. Por su parte, los cocientes de intensidades de Arias varían de 0.56 a 0.97 para $T_{SE} = 0.5$ s y de 0.73 a 0.97 para $T_{SE} = 1.0$ s.

6. CONCLUSIONES

El estudio se centró en el análisis de 9 modelos de elemento finito representativos de los apoyos convencionales de neopreno para puentes. Los modelos se analizaron bajo distintos tipos de señales dinámicas que se aplicaron como fuerzas laterales. Las principales conclusiones son las siguientes:

- El modelo original ($T = 0.56$ s) sometido a las señales sísmicas se comportó como aislador para los registros de Caleta y SCT. Con el registro de Caleta se alcanzó una reducción de la respuesta de 10% para aceleraciones máximas y 15% para intensidades de Arias. Para el registro SCT, la disminución fue de 38% y 65%, respectivamente. Para CU no hubo disminución de la respuesta.

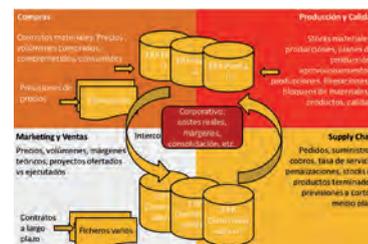
- Para los modelos con rigidez modificada sometidos al registro sísmico de Caleta (terreno duro en zona epicentral), sólo funcionaron como aisladores los modelos a los cuales se les disminuyó la rigidez ($0.7 \text{ s} \leq T \leq 3.04 \text{ s}$). En este caso, la disminución de la respuesta llegó a ser de 20% para aceleraciones máximas y 32% para intensidades de Arias. Los modelos a los que se les aumentó la rigidez ($0.44 \text{ s} \leq T \leq 0.35 \text{ s}$) presentan amplificaciones de hasta 6% (aceleraciones máximas) y 19% (intensidades de Arias).
- Para el registro de CU, sólo los modelos 2 ($T = 1.91 \text{ s}$) y 3 ($T = 1.41 \text{ s}$) presentan disminuciones de la respuesta (aceleraciones máximas), las cuales son de hasta 10%.
- Para SCT, los modelos con periodo $T \leq 0.7 \text{ s}$ funcionan como aisladores y presentan disminuciones de la respuesta de hasta 45% (aceleraciones máximas) y 85% (intensidades de Arias).
- Cuando los modelos se someten a señales teóricas senoidales, se observa que ninguno presenta reducción de las máximas aceleraciones. Para las intensidades de Arias, sólo los modelos con $T \geq 1.41 \text{ s}$ tienen reducciones, que pueden ser de hasta 18%. Para estas señales, se alcanzaron amplificaciones de la respuesta de hasta 151% para las máximas aceleraciones y 439% para intensidades de Arias.
- Cuando el apoyo se somete a las excitaciones de las pruebas de vibración, se observa que todos los modelos analizados funcionan como aisladores sísmicos. En este caso, las mayores reducciones de la respuesta se presentan para el modelo 2 y son de 37% para las máximas aceleraciones y 44% para las intensidades de Arias.
- Respecto a las curvas de histéresis, se observó que la energía disipada por el apoyo de neopreno sometido a la señal con $T_{ST} = 2 \text{ s}$, fue menor a la que se disipó para la señal con $T_{ST} = 0.5 \text{ s}$. Esta diferencia es de 410%.
- El amortiguamiento histerético del apoyo sometido a la señal teórica ($T_{ST} = 2 \text{ s}$) resultó de 11.09 %, mientras que para el apoyo sometido a la señal con $T_{ST} = 0.5 \text{ s}$ fue de 5.23 %. El modelo sometido a la señal con $T_{ST} = 0.5 \text{ s}$ se degrada más rápido.
- La eficiencia como aisladores de base de los apoyos convencionales de neopreno depende en forma importante, de las características de la excitación y de las propiedades dinámicas del sistema estructura – apoyo. En particular, del contenido de frecuencias de la excitación y del periodo fundamental de vibración del puente en la dirección de análisis.
- La estrategia que se debe seguir para dimensionar los apoyos convencionales de neopreno, radica en proporcionarles la rigidez horizontal adecuada; con el propósito de buscar que el periodo fundamental del puente se salga de la zona en que se encuentran los periodos de la excitación. Ello, para evitar el acoplamiento de periodos de la estructura con los de la excitación. Para terreno blando, la zona en que deseablemente se debe encontrar el periodo fundamental de los puentes, tiene como límite superior un periodo igual a $T = 0.7 \text{ s}$. Para sitios de terreno duro, esta zona tiene como límite inferior $T = 1.5 \text{ s}$ para el Valle de México y $T = 1 \text{ s}$ para la zona epicentral.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M.-Kelly J. "Analysis of fiber-reinforced elastomeric isolators". JSEE, 1999. Vol.2-1 p.19-34.
- [2] Strauss A, Apostolidi E, Zimmermann T., et al. "Experimental investigations of fiber and steel reinforced elastomeric bearings: Shear modulus and damping coefficient". Engineering Structures, 2014. Vol.75 p.402-413. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.06.008>
- [3] Sánchez J, Masroor A, Mosqueda G., et al. "Static and dynamic stability of elastomeric bearings for seismic protection of structures". Journal of Structural Engineering ASCE, 2013. Vol.139 p.1149-1159. DOI [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000660](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000660)
- [4] Spizzuoco M., Calabrese A. and Serino G. "Innovative Low-Cost recycled rubber-fiber reinforced isolator: Experimental test and finite element analysis". Engineering Structures, 2014. Vol. 76 p.99-111. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.07.001>
- [5] Chen W. F. and Duan L. Bridge Engineering Handbook. CRC Press. 2000, 26.1-26.12. ISBN: 9781420049596
- [6] Byung-Young M., Gyung-Ju K., Beom-Soo K. et al. "Design and Manufacturing of fiber reinforced elastomeric isolator for seismic isolation". Journal of Material Processing Technology, 2002, Vol.130-131 p.145-150. DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00713-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00713-6)
- [7] Gyung-Ju K., Beom-Soo K.Kang. "Dynamic analysis of fiber-reinforced elastomeric isolation structures". Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, Vol.23 p.1132-1141. DOI <http://dx.doi.org/10.1007/s12206-008-1214-y>
- [8] Valdés-González J., De la Colina-Martínez J, Díaz-Camacho S.A. "Evaluación experimental de la capacidad de aislamiento de los dispositivos de apoyo de un puente vehicular". Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, 2010 p.1-17.
- [9] Valdés-González J., De la Colina-Martínez J, González-Pérez C. A. "Pruebas dinámicas para determinar el nivel de aislamiento sísmico de los apoyos de neopreno de un puente vehicular". XX Congreso de Ingeniería Sísmica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, 2015.
- [10] Toopchi-Nezhad H., J.-Tait M. and G.-Drysdale R. "Bonded versus unbonded strip fiber reinforced elastomeric isolators: Finite element analysis". Composite Structures, 2011. Vol.9 p.850-859. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.07.009>
- [11] Osgoeei M.P., J.-Tait M., Konstantinidis D. "Finite element analysis of unbonded square fiber-reinforced elastomeric isolator (FREIs) under lateral loading in different directions". Composite Structures, 2014. Vol.113 p.164-173. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.02.033>
- [12] Van-Engelen N.C., M.-Osgoeei P., J.-Tait M. et al. "Experimental and finite element study on the compression properties of modified rectangular fiber-reinforced elastomeric isolators (MR-FREIs)". Engineering Structures, 2014. Vol.74 p.52-64. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.04.046>
- [13] Osgoeei M.P., Van Engelen N.C., Dimitrios Konstantinidis and Michael T. "Experimental and finite element study on the lateral response of modified rectangular fiber-reinforced elastomeric isolators (MR-FREIs)". Engineering Structures, 2015. Vol. 85, p.293-303. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.11.037>
- [14] Mordini A. and Strauss A. "An innovative earthquake isolation system using fibre reinforced rubber bearings". Engineering Structures, 2008 Vol. 30, p.2739-2751. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.03.010>
- [15] Das A., Dutta A. and Deb S. K. "Performance of fiber-reinforced elastomeric base isolators under cyclic excitation". Structural Control and Health Monitoring, 2014, DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/stc.1668>
- [16] American Association of State Highway and Transportation Officials. Bearings, Section 14, 2007, Washington D.C.
- [17] ANSYS® Workbench™ (2013). User's manual, revision 15.0". Swanson Analysis System Inc.
- [18] García-R. M, Ruiz-S O y López C. Technical Report Hyperelastic Material Modeling. Colombia: Laboratorio CAD/CAM/CAE, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad EAFIT, 2005, Medellín.
- [19] Ray W O. Large deformation isotropic elasticity – on the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids. Royal Society of London. 1972, Vol. 326, 565-584 p. DOI <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1972.0026>
- [20] Jara Díaz M, Jara Guerrero J M y Casas Rius J R. Protección sísmica de estructuras con dispositivos de control. México: Autor, 2006, 304 p. ISBN 970-703-445-3
- [21] Villaverde R. Fundamental Concepts of earthquake engineering. United States of America: CRC Press, Taylor Francis and Group,2009. 960 p. ISBN: 9781420064957

Aplicación de un sistema business intelligence en un contexto big data de una empresa industrial alimentaria

Application of a business intelligence tool within the context of big data in a food industry company



Aitor Goti-Elordi, Alberto de-la-Calle-Vicente, María-José Gil-Larrea, Ander Errasti-Opakua y Juraj Uradnicek

Universidad de Deusto. Avda. de las Universidades, 24 – 48007 Bilbao (España). Tfno: +34 944 139000

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8008> | Recibido: 23/03/2016 • Evaluado: 23/03/2016 • Aceptado: 23/11/2016

ABSTRACT

- The so called Industry 4.0 promotes, among others, the use of Business Intelligence (BI) systems for the management of enormous data quantities coming from Big Data environments. BI systems comprise the applications, infrastructure, tools and best practices that permit the access to and the analysis of the information to improve - optimize decision making processes in both agility and performance. This article presents an implementation case of a Business Intelligence tool in a food industry company with BI characteristics where different data sources to offer information that improves the decisions taken by managers. This implementation shows that the combination and integration of different data sources (DI) via Business Intelligence tools permits obtaining not only an intuitive approach for the decision making but a really grounded and agile one that enables the improvement of business results.
- **Keywords:** Industry 4.0, Big Data, Business Intelligence, Food Industry, ERP systems.

RESUMEN

La denominada Industria 4.0 o cuarta revolución industrial promueve, entre otros, el uso de los sistemas de inteligencia de negocio o Business Intelligence (BI) para el manejo de grandes cantidades de datos provenientes de entornos Big Data. Los sistemas BI contemplan tanto aplicaciones, infraestructura y herramientas, como las mejores prácticas que permiten el acceso y el análisis de la información para mejorar y optimizar los procesos de toma de decisión tanto en agilidad como en rendimiento de sus resultados. El presente artículo presenta un caso de implantación de un sistema BI en un entorno industrial alimentario con características Big Data en la que se combinan informaciones de diversas fuentes para ofrecer información que mejore la toma de decisiones de los mandos. La conclusión de esta implantación es que el proceso de integración de informaciones de diversas fuentes (Data Integration - DI) mediante herramientas BI permite una toma de decisiones además de intuitiva, mucho más fundamentada y ágil que favorece la mejora de los resultados empresariales.

Palabras clave: Industria 4.0, Big Data, Business Intelligence, Inteligencia de Negocio, Industria alimentaria, Sistemas ERP.

1. INTRODUCCIÓN

El momento actual se presenta como un periodo clave denominado ya como "Industria 4.0" o "cuarta revolución industrial".

La Industria 4.0 promueve la automatización mediante sistemas informáticos de la industria manufacturera y su objetivo es la Fábrica Inteligente o *Smart Factory* [1]. Su desarrollo se considera un factor clave en el posicionamiento estratégico no sólo de las empresas, sino de las regiones, países y continentes a corto, medio y largo plazo. Así, no sorprende que gobiernos como el de Estados Unidos [2] y la Comisión Europea [3] lo tomen ya en consideración en el desarrollo de sus políticas industriales. Un estudio llevado a cabo por la Asociación Alemana de Tecnologías de la Información, Telecomunicaciones y nuevos medios digitales junto con el instituto *Fraunhofer* para la Ingeniería Industrial, apunta a que la Industria 4.0 tendrá un impacto potencial de crecimiento de su producto interior bruto del 11,5% para el año 2035 [4]. La Ref. [5] indica que el impacto de la digitalización en el tejido industrial manufacturero conllevará crecimientos de entre el 15 y 20% para el año 2030.

La Industria 4.0 contempla dentro de un mismo paradigma los últimos avances en *hardware* y *software* al servicio de la industria tales como el Internet de las cosas (con máquinas colaborando con otras máquinas), los Sistemas ciber-físicos (en los que el ser humano interactúa con la máquina de forma natural y segura), la Cultura '*hacedora*' o *maker-culture* (con dispositivos de personalización tales como las impresoras 3D), los sistemas de simulación (tales como la Realidad Aumentada, la Simulación de procesos productivos para predecir comportamientos de entornos y activos productivos) o la tecnología Big Data para el tratamiento, procesamiento y representación de grandes volúmenes de datos.

El *Big Data* puede ser definido de manera simple como un sistema que permite la colección e interpretación de conjuntos de datos que por su gran volumen no es posible procesarlos con las herramientas convencionales de captura, almacenamiento, gestión y análisis. Las tecnologías de Big Data están diseñadas para extraer valor de grandes volúmenes de datos, provenientes de distintos tipos de fuentes, de una manera rápida y económica [6]. El objetivo es apoyar el proceso de toma de decisiones basándose en información gestionando las cinco "V" [7]: Volumen, Variedad, Velocidad, Veracidad y Valor. Un sistema Big Data se puede estructurar en tres capas (Figura 1): (1) la capa de infraestructura (como un servicio de almacenamiento y distribución de la computación), (2) la capa de computación (con *middleware* que incluye las herramientas para la integración y gestión de datos, junto con el modelo de programación) y, (3) la capa de aplicación-visualización (con aplicaciones de negocio, servicios web, multimedia, etc.).

El Big Data ha comenzado a ser el presente y acapará el futuro del empleo en el mundo. Así, varias son las fuentes que hacen

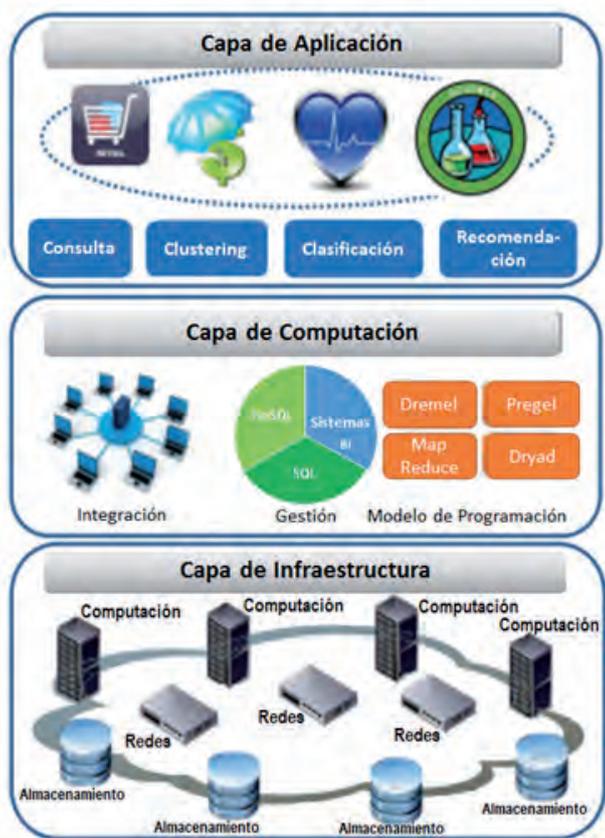


Fig. 1: Elementos clave del Big Data [6]

referencia a la oportunidad de empleo que existe alrededor del Big Data. Según el grupo Gartner [8], en 2015 ya eran necesarias 4,4 millones de personas formadas en el campo del análisis de datos y su explotación. En este sentido, se afirma que McKinsey sitúa en torno al 50% la brecha entre la demanda y la oferta de puestos de trabajo relacionados con el análisis de datos en 2018 [9]. Es decir, existe un enorme déficit de científicos de datos y si ese déficit existe, es porque estos futuros empleados serán necesarios, entre otros, en los sectores productivos que deben integrar Big Data en sus procesos de decisión. A este respecto, merece destacar que la tecnología Big Data ofrece nuevas posibilidades a la minería de datos o las herramientas de inteligencia de negocio tradicionales [10].

En adición al Big Data, los sistemas BI se enmarcan dentro de la Industria 4.0, e incluyen aplicaciones, infraestructura, herramientas y buenas prácticas que permiten el acceso y el análisis de la información para mejorar tanto el proceso de toma de decisiones como su impacto [8]. Shukla y Dhir [11] definen los sistemas BI como el conjunto de técnicas y herramientas para la transformación de grandes cantidades de datos sin procesar en información visual coherente y útil para el análisis de los negocios en cuestión de segundos. El Big Data y los sistemas BI están cambiando las empresas y la industria [12], aunque su grado de implantación no es, de momento, tan alto como cabría esperar [13][14].

Partiendo del siguiente enmarque el objetivo de la presente investigación es mostrar un caso de aplicación exitoso de un sistema BI en un contexto Big Data de una empresa del sector de la alimentación. Adicionalmente, el estudio analiza el estado del arte referente al despliegue de los sistemas BI en la industria, enfatizando en el caso que atañe al artículo, el de las industrias alimentarias. Así, el apartado 2 presenta el estado del arte para

posteriormente exponer los materiales y métodos implementados en el apartado 3. Finalmente, los apartados 4 y 5 exponen respectivamente los resultados cuantitativos y cualitativos obtenidos gracias a la implantación de los cubos BI y las conclusiones que se extraen de la investigación presentada.

2. ESTADO DEL ARTE

Como indican Shukla y Dir [11] en una exposición descriptiva de 5 herramientas BI disponibles en el mercado en la que muestra el segmento de mercado que abarca cada una de ellas, las tecnologías BI aplican el proceso de Visualización de Datos, proceso que facilita la comprensión por parte del usuario a través de su visualización semi-automática a partir de utilizar diagramas de barras, de radar, etc.

Destacar que su implementación es un desafío en sí mismo, pues uno de los aspectos fundamentales que contribuye al fracaso de este tipo de iniciativas es el acceso y utilización de la tecnología, es decir, la capa de infraestructura y de computación. Pero el tecnológico no es el único factor, la cultura organizativa y la disposición al cambio contribuyen a que el problema comprenda también una dimensión social. Esta complejidad contribuye, sin lugar a dudas, que pese a ser uno de los campos que despiertan mayor interés para mejorar la competitividad empresarial de las industrias manufactureras no se hayan encontrado demasiados casos de éxito en la literatura [15], al menos hasta los últimos años.

Concretamente, a la hora de revisar las referencias recopilatorias más importantes en el tema, Mazuin et al. [16] presentan un estudio del nivel de aplicación de herramientas BI en la industria en el que estudian 9 casos referentes a los sectores de semiconductores, cemento, químico, grifería, manufactura en general, plásticos, farmacia y automoción.

Ur-Rahman [17] elabora una encuesta sobre las técnicas de inteligencia artificial futuras de apoyo a la toma de decisión en entornos industriales. El artículo enfatiza en que la implementación de técnicas de BI son tremendamente susceptibles a la calidad y fiabilidad de los datos. En referencia a los casos industriales que analiza en su revisión de la literatura, el escrito hace mención a implantaciones industriales del área de semiconductores, automoción, etc., pero nunca al sector de la industria alimentaria.

Fitriana y Djatna [18] presenta un estudio de 60 casos en los que algunos de ellos son industriales referentes al sector de automoción o de los semiconductores, pero ninguno vinculado a la industria alimentaria. El artículo marca como líneas futuras la implementación de un sistema BI en el sector de la industria alimentaria (subsector lácteo concretamente) que es a posteriori presentado en la Ref. [19].

Rashid Al-Azmi [20] presenta una exhaustiva revisión de la literatura (en la que se revisan más de 60 escritos) referente a los campos de minería de datos, texto y webs que dentro de los sistemas BI sirven para encontrar posibles relaciones inicialmente ocultas y predecir comportamientos a partir de estudiar grandes cantidades de datos. Dentro de la literatura revisada sólo se menciona un caso referente al sector de la alimentación [21], pero éste no se enfoca a la manufactura sino que se centra en la cadena de distribución.

Así, y pasando ya a mostrar los artículos vinculados a la temática BI relacionados con la industria alimentaria, merece destacar que el caso mostrado en Fitriana y Djatna [19] describe la implementación de una herramienta de *Análisis de Modos de Fallo y Efectos* - AMFE (herramienta para la priorización de riesgos en la

toma de decisiones) en una granja de leche y que, por la cantidad de datos que maneja, no puede ser considerado como un caso de aplicación de técnicas de Big Data. Van den Berg et al. [22] muestra un caso de aplicación de técnicas BI para la monitorización de la calidad del proceso a través de aplicación de la Tecnología Analítica de Proceso (*Process Analytical Technology, PAT*); el PAT es un mecanismo para el diseño, análisis y control de procesos de manufactura generalmente farmacéuticos por medio de la medición de parámetros críticos de proceso que afectan a atributos críticos de calidad. En referencia a este caso, debido a la cantidad de datos que aparentemente maneja y al alcance de la iniciativa (limitado a parámetros de calidad), se considera que no se puede decir que el mismo sea un caso de despliegue del Big Data. Es más, ninguna de estas referencias describe su caso como una aplicación realizada en un contexto Big Data.

Como se indicaba anteriormente, no se han encontrado demasiadas aplicaciones de sistemas BI en la industria manufacturera que puedan considerarse como casos de Big Data. Limitando la revisión de la literatura al sector de la industria alimentaria se puede concluir que no se ha conseguido encontrar ningún caso de aplicación de herramientas BI en un contexto Big Data en dicho campo. Por tanto, el presente proyecto viene a cubrir esta carencia.

3. MATERIALES Y METODOS

La presente implementación de un sistema BI en un contexto de Big Data se ha desarrollado en la una multinacional del sector del chocolate con aproximadamente 1100 empleados repartidos en 6 plantas productivas que facturaron durante el 2015 367,8 M€, gracias a vender cerca de un billón de unidades de producto en varios millones de líneas de pedido de clientes. La multinacional maneja información referente a distintas áreas de negocio de al menos 5 ejercicios en sus procesos de toma de decisiones, dando así una idea de la cantidad de datos que se manejan. Por ejemplo, de cara a la calidad de producto que fabrica, cada unidad debe poder ser trazada unitariamente ante cualquier potencial incidencia de calidad, extrayendo de qué materias primas y procesos productivos se obtiene la misma de cara a establecer posibles correlaciones, realizar análisis estadísticos, etc. En referencia al servicio al cliente, todas las arriba mencionadas líneas de pedido cuentan con diferentes políticas de servicio y penalizaciones que deben poder ser analizadas unitariamente ante cualquier potencial fallo de servicio que el cliente desee reclamar. Estos ejemplos son sólo algunos de los ejemplos que demuestran que la multinacional necesita cumplir y cumple con las premisas que conforman las 5 "V" del Big Data anteriormente mencionadas.

Así, los métodos y materiales utilizados en el caso son respectivamente presentados en las secciones 3.1 y 3.2, para exponer en la sección 3.3 en un ejemplo de producción cómo han sido combinados estos métodos y materiales para obtener, entre otras, las funcionalidades que se muestran en la sección 3.4, y el despliegue de dicho tipo de funcionalidades que se muestran en la sección 3.5.

3.1. MÉTODO

La multinacional ha desplegado su herramienta BI (Qlikview®) para el análisis de datos tanto de manera centralizada (para las compras, la logística, las ventas, etc.) como de manera descentralizada (para satisfacer la demanda de información de una planta). Para ello, el método aplicado ha sido el del Prototipado Rápido o *Quick Prototyping*, el cual, como se explica en la Ref. [23], consiste en actuar antes de disponer los resultados y dejarse persuadir por los resultados para ir afinándolos. El Prototipado Rápido consiste en la actuación concurrente de las etapas de diseño y desarrollo de un producto para que el equipo de proyecto pueda probarlo de manera experimental, observarlo e incluso sentirlo lo antes posible con el fin posterior de mejorarlo. Concretamente, la secuencia de pasos adaptada por la empresa en dicho prototipado se muestra en la Fig. 2.

Concretamente, la metodología de implantación siguió un proceso cíclico de selección y desarrollo del área (compras, producción, etc.) a implementar, para posteriormente realizar concurrentemente tomas de requerimientos, diseños conceptuales, diseños funcionales y prototipados que los usuarios probaron para su validación o adaptado. Las pruebas se realizaron sin integrar el desarrollo realizado con el resto de sistemas de la empresa (esto es, con datos experimentales y en un entorno hardware y software específicos de prueba, no interactuando con el resto de desarrollos realizados hasta el momento). En caso de que fuese necesario el desarrollo sería adaptado hasta su aceptación, y en ese momento se probaba el mismo en un entorno de test que ya integrase el resto de programación elaborada para las otras áreas de la empresa. Una vez finalizada la solución, ésta se daba por cerrada y pasa a una fase de mantenimiento mientras que el equipo IT abordaba otra área de la empresa.

Tal y como se muestra en la Fig. 3, el despliegue del sistema BI de la empresa comprende, a grandes rasgos, la elaboración de 5 cubos de procesamiento analítico en línea (u *On-Line Analytical Processing, OLAP*, también denominados cubos o cubos BI) para las áreas de compras, producción y calidad, marketing y ventas, Supply Chain (o cadena de suministro) y Corporativo. Estos cubos OLAP recogen información actualizada de los servidores para copiar y comprimirla en un servidor de datos del BI que posterior-

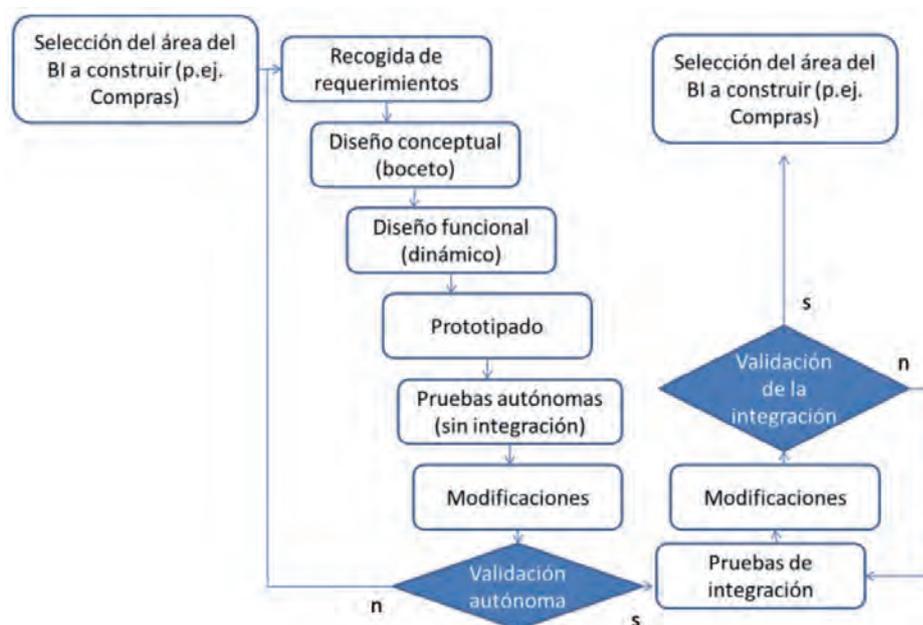


Fig. 2: Metodología de prototipado rápido adoptada por la multinacional en el despliegue de su sistema BI

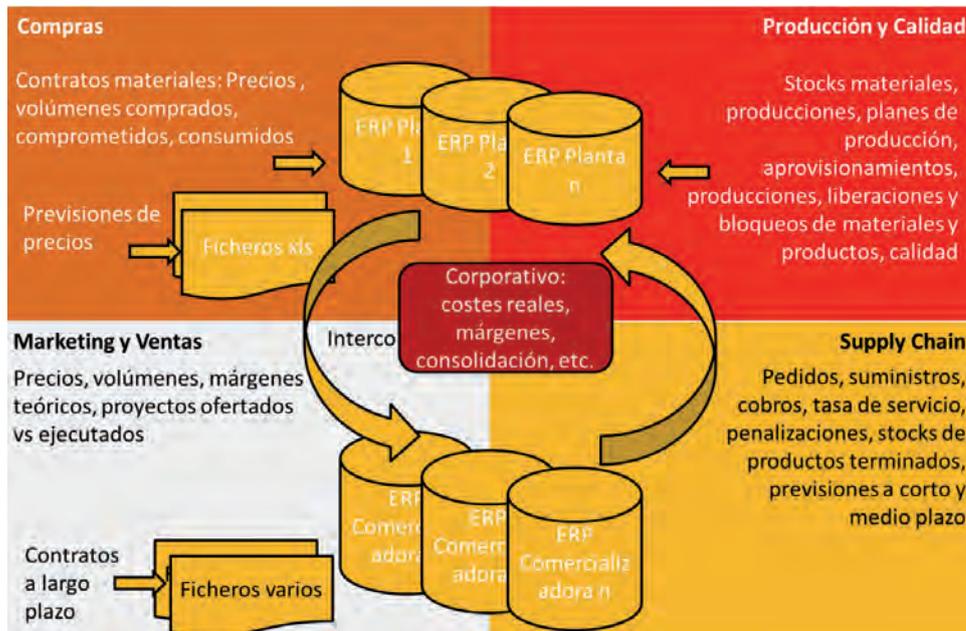


Fig. 3: Estructura del sistema BI de la multinacional y orígenes de datos de dicha estructura

mente el propio motor del BI (ubicado en otro servidor) utilizará para una consulta y visualización casi instantánea. Como muestra la propia Fig. 4, cada una de estas áreas ofrece soporte a la toma de decisión en temas tan diversos como la gestión de los contratos de compra, la gestión de productos bloqueados por calidad, las reclamaciones referentes a bajas tasas de servicio, etc.

3.2. MATERIALES

El despliegue mostrado en las secciones siguientes del artículo fue realizado basándose en la utilización de una serie de servidores utilizados para a) soportar los entornos de los ERPs (sistemas *Enterprise Resource Planning* o de Planificación de Recursos Empresariales), b) los servidores documentales y de aplicaciones adicionales, c) el servidor de gestión de la herramienta BI y d) el servidor de la herramienta de gestión de datos del BI.

Así, el conjunto de cubos del BI del caso se alimenta principalmente de los ERPs de las plantas y las comercializadoras, las cuales inicialmente se encontraban en todo tipo de plataformas ERP (SAP R3, Baan, Navision y AX) y que se encuentran en un proceso de migración a AX2012. Esta información es complementada por distintos tipos de ficheros que se encuentran en otro tipo de plataformas (p.ej. *Sharepoint*) y aplicaciones de diversa índole (tales como p.ej. SAP BPC). Adicionalmente, los ERPs del grupo interactúan unidireccional o bidireccionalmente con hardware y aplicaciones de diversa índole, tales como pistolas de escaneo de códigos de barra, sistemas de escaneo de facturas, etc.

3.3. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN

Previo al detalle del despliegue de todos los cubos de información del caso (expuesto en la sección 3.5) se ha considerado necesario mostrar cómo se han combinado el método expuesto en la sección 3.1 con los materiales detallados en la sección 3.2, en el caso concreto de uno de los cubos. El caso reflejado en el presente artículo muestra una versión modificada (por motivos de confidencialidad) del BI de control de producción de una de sus plantas productivas. Para este caso se ha combinado la información proveniente de dos fuentes de datos cruzando el reloj de fichaje (gestionado por un software específico de fichaje) y la entrada de las producciones (realizada en el sistema de planificación de recursos

empresariales o *Enterprise Resource Planning*, ERP) para obtener automáticamente y en tiempo real, datos como el coste de mano de obra de un producto, quién ha intervenido en la elaboración de un lote defectuoso, etc. Concretamente, el sistema BI es capaz de integrar estas fuentes de datos distintas en fondo y forma para construir un modelo entidad-relación. Esto posibilita, tal y como se muestra en las siguientes secciones, la visualización de información que de otra manera resulta difícil de obtener: así, la potencialidad del BI en este caso, radica en su capacidad para lograr los resultados que se presentan en la siguiente sección entrelazando las tablas de orígenes y características distintas mostradas anteriormente.

3.4. FUNCIONALIDADES OBTENIDAS

Una vez construido el modelo, la herramienta de BI realiza una lectura periódica de los datos y visualiza los datos cruzados que se crean convenientes. En este caso, la herramienta sirve para poder filtrar y obtener cualquier dato que se encuentre en la zona de filtros de la pantalla del BI (zona izquierda de la Fig. 4). La herramienta muestra como resultado (en la parte central de la misma pantalla) todo tipo de información solicitada como, por ejemplo: a) quién ha elaborado un palé que tenga un número de SSCC (Serial Shipper Container Code, número de identificación de la unidad logística producida, en este caso el palé) en concreto, junto con cuándo ha sido elaborado, b) qué trabajadores han producido más o menos unidades en un periodo, o c) como se muestra en la Fig. 4, qué cantidades de producto se han producido en un periodo en una línea tanto en total (en la parte inferior) así como la producción por referencia (en la parte superior de la imagen).

Las ventajas de contar con el sistema implantado son evidentes: previo a la implantación del mismo, y en referencia a lo mostrado en la Fig. 4, la visualización de este tipo de informaciones no era gráfica, ni tan fácil de filtrar como con la herramienta BI. En referencia a la trazabilidad unitaria de los productos terminados para investigar quién había elaborado cada producto ante incidencias, en el pasado ésta era 100% manual y basada en bonos (no resultando ni ágil ni operativo) mientras que actualmente dicha información se obtiene al instante. Asimismo, la comparación de productividades por operario no se realizaba y se limitaba a valoraciones subjetivas. De esta manera, se puede afirmar que la aplicación del BI facilita y agiliza la obtención y el análisis de la información, reduciendo la incertidumbre para la toma de decisiones y aportando evidencias para dicho proceso.

3.5. DESPLIEGUE DEL RESTO DE CUBOS

En el anterior apartado se ha mostrado el detalle de cómo se han obtenido las funcionalidades obtenidas por una pequeña parte del cubo de producción. Como se ha comentado previamente, además del cubo de producción, el despliegue del sistema BI comprendía la elaboración de los cubos de compras, ventas y marketing, *Supply Chain* y corporativo. Las siguientes Figs. exponen pantallas de los 4 cubos BI adicionales al de producción (mostrado previamente), en los que se ha ocultado mediante recuadros en azul di-



Fig. 4: Gráfico de unidades producidas en una línea productiva por periodo anonimizado

versa información que la empresa ha considerado adecuado no mostrar por motivos de confidencialidad. Así, el cubo BI de compras muestra (entre otros) la información plasmada en la Fig. 5.

En el ejemplo de la Fig. 5 se muestra la herramienta BI creada para el seguimiento de la evolución de las materias primas de la multinacional. Como se puede apreciar en el ejemplo, la herramienta sirve para comparar los precios y volúmenes de compra establecidos en presupuesto ('Budget Tons' y 'Budget €/kg') con

los consumidos hasta el momento ('Carry over Tons' y 'Carry-over €/kg') frente a los que se ha cerrado ya un contrato en el que se fijan cantidades y precios a consumir ('Contract Tons' y 'Contract €/kg'), para obtener datos de cuánto del ejercicio está cubierto con la compra (Coverage) y cuál es el precio medio de compra (ABP€/kg) y así calcular el ahorro previsto respecto al presupuesto. Por su parte, el cubo de marketing y ventas tiene la apariencia que se muestra en la Fig. 6.

Material Family	Material Subfamily	Budget Tons	Budget €/ Budget K€	Carry-over Tons	Carry-over €/ Kg	Contract Tons	Contract €/ Kg	Left Tons	LE €/ Kg	Left K€	Coverage	ABP €/ Kg	Saving K€
Miscellaneous	Total												
Miscellaneous	Coconut												
Miscellaneous	Flour	670	0.350	235	0-	785	0.285	0-			117.16%	0.285	+34
Miscellaneous	Lecithine												
Miscellaneous	Vanilla												

Fig. 5: Pantallazo del cubo BI de compras

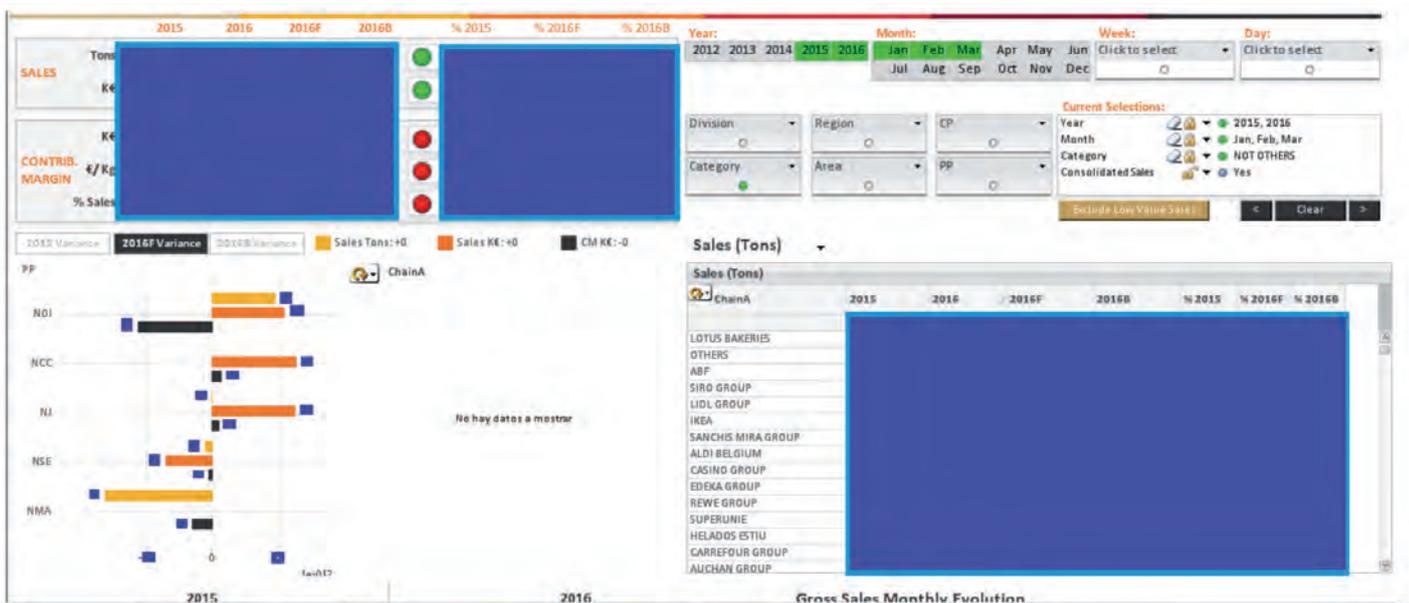


Fig. 6: Pantallazo del cubo BI de marketing y ventas

En la que es posible analizar, entre otros, tanto ventas como márgenes de clientes por grupos (parte superior izquierda), por plantas productivas (parte inferior izquierda) o clientes individuales, seleccionando el periodo de tiempo que se desea. Por su parte, el cubo de *Supply Chain* es mostrado en la Fig. 7.

Esta pantalla sirve para realizar un seguimiento de la tasa de servicio brindado a tiempo y en cantidad adecuados (*On Time In Full*, OTIF) por planta (ver parte izquierda de la Fig.), cliente, referencia, etc. en el periodo estudiado mostrando también una evolución del stock de producto terminado tanto en días de cobertura como en Toneladas (gráfico de la parte inferior derecha). Finalmente, la Fig. 8 muestra una captura de pantalla de parte del cubo BI corporativo, en el que se hace seguimiento a los 27 proyectos estratégicos de mejora del grupo: en ellos se realiza un seguimiento para controlar en qué medida la mejora esperada (*'Target Annual Savings (K€)'*) está siendo lograda mediante el progreso actual (*'Actual Annual Savings (K€)'*).

4. RESULTADOS

Al formar parte del mercado continuo español, la multinacional debe hacer públicos sus resultados de manera trimestral. Como se constata en el descargo de resultados que la compañía realiza trimestralmente, las mejoras realizadas en el área de operaciones (producción y *Supply Chain*) han favorecido una mejora del negocio tanto del año anterior como del presente ejercicio. Concretamente, el escrito justifica los resultados obtenidos en base a "la mejora en los costes directos de producción, fundamentalmente en los gastos de personal y los costes de transporte, junto con la mejora de otros gastos de explotación". Se entiende que el BI ha servido para apoyar el apoyo a la toma de decisiones y que, por tanto, ha influido en el resultado. Merece destacar que, por ejemplo, y como se muestra en la (parte central superior) de la Fig. 7 la tasa de servicio OTIF ha mejorado un 6,42% comparando el año en curso con el anterior aun habiendo reducido los costes asociados al transporte.

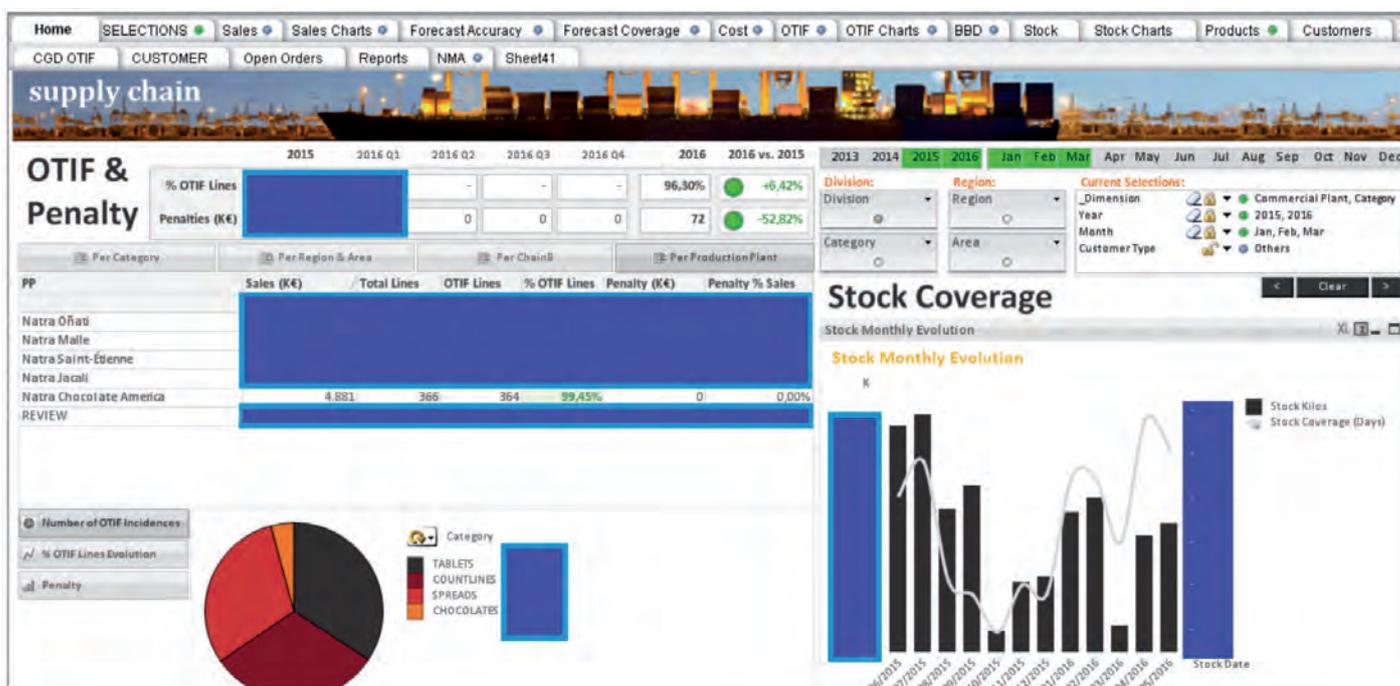


Fig. 7: Pantallazo del cubo BI de Supply Chain

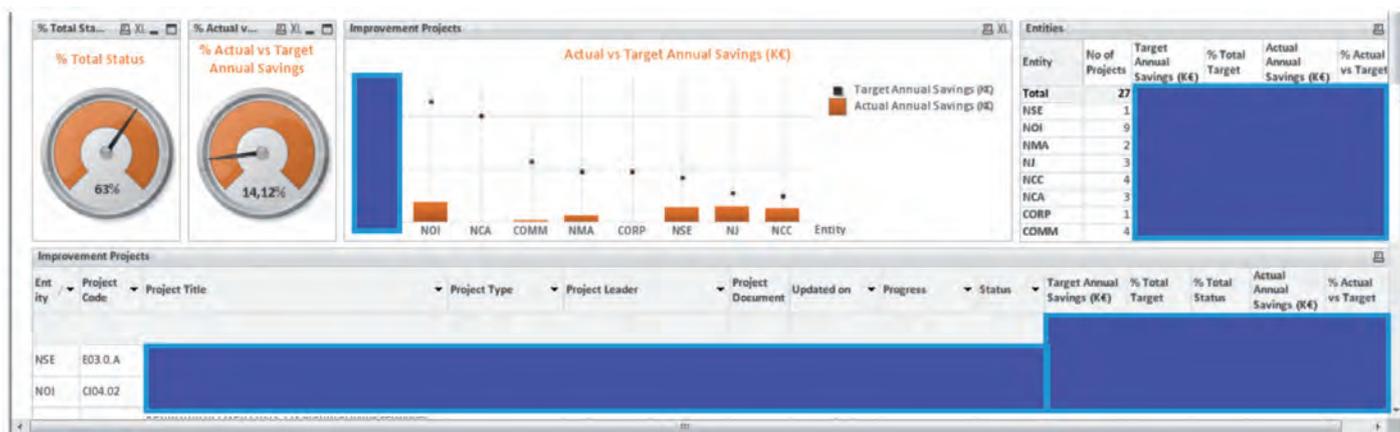


Fig. 8: Pantallazo del cubo BI corporativo

A los resultados cuantitativos obtenidos se les puede añadir otra serie de ventajas obtenidas a raíz de la implementación realizada, pues el sistema ha servido, entre otros, para: a) discriminar clientes en base a criterios de negocio basados en datos, b) priorizar clientes cuando se ha contado con una cantidad limitada de recursos y no era posible servir a corto plazo a todos, c) actuar ágilmente ante fluctuaciones de disponibilidad de mercado en referencia a determinadas materias primas, d) mejorar el seguimiento a productos que podían transformarse en obsoletos, etc.

5. CONCLUSIONES

En el presente artículo se presentan la potencialidad del Big Data y los sistemas BI en el marco de la Industria 4.0 indicando que, cómo a pesar de ello, en la literatura no se encuentra una cantidad significativa de casos de éxito o buenas prácticas de su aplicación el área de operaciones de la industria manufacturera, y especificando que no se han encontrado casos de este tipo referentes a la industria alimentaria. A continuación, se expone el despliegue e implementación del BI en un grupo industrial alimentario que puede ser considerado como un caso de Big Data. Dicho despliegue expone a detalle el desarrollo de la solución y las funcionalidades obtenidas para el caso concreto de un sistema de control de gestión de la producción, y muestra en su globalidad parte de los 5 cubos creados en el grupo. Posteriormente se exponen los resultados y ventajas obtenidos gracias a la implementación del sistema, entre los que destacan una mejora de la cifra de negocio global, enfatizando en un aumento de la tasa de servicio a clientes y una reducción de los costes de producción y transporte.

A nivel pedagógico cabe destacar que el caso desarrollado ha servido para desarrollar ejemplos pedagógicos en los grados y másteres de Ingeniería en las clases que los autores imparten. Para ello se ha utilizado la versión gratuita del software aplicado en la empresa mostrada (Qlikview®), ofreciendo a los alumnos versiones modificadas de los datos manejados en la realidad y enfrentándoles al reto de construir sus propios cubos. Los resultados obtenidos han sido alentadores, pues en algunos de los casos los alumnos han sugerido a los profesores mejoras que la empresa ha considerado conveniente implementar.

En cuanto a las líneas futuras, éstas se orientan al análisis de cuánto de necesaria es la adecuación de los procesos y los sistemas de información de las distintas partes de la empresa utilizando como soporte, por ejemplo, un sistema ERP común en todas sus áreas para que la información obtenida sea completamente confrontable, pues la utilización de distintos procesos y plataformas dificulta la comparabilidad entre distintas plantas y delegaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Editorial, "¿SUPONDRÁ LA ECONOMÍA CIRCULAR LA QUINTA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL?", *DYNA Ing. e Ind.*, vol. 91, no. 5, p. 477, 2016.
- [2] P. C. Evans and M. Annunziata, "Industrial Internet: Pushing the Boundaries of Minds and Machines," *Gen. Electr.*, p. 37, 2012.
- [3] M. Blanchet, T. Rinn, G. Von Thaden, and D. T. Georges, "Industry 4.0 The new industrial revolution How Europe will succeed," *Rol. Berger Strateg. Consult.*, no. March, pp. 1 - 24, 2014.
- [4] W. Bauer, S. Schlund, O. Ganschar, and D. Marrenbach, "Industrie 4.0 - Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland," *Bitkom, Fraunhofer Inst.*, pp. 1 - 46, 2014.
- [5] E. y P. Comisión Europea, Foro de políticas estratégicas sobre el emprendimiento digital, Dirección General de Mercado Interno, Industria, "Report: Digital Transformation of European Industry and Enterprises." 2015.

- [6] H. Han, W. Yonggang, C. Tat-Seng, and L. Xuelong, "Toward Scalable Systems for Big Data Analytics: A Technology Tutorial," *Access, IEEE*, vol. 2, pp. 652-687, 2014.
- [7] M. White, "Digital workplaces: Vision and reality," *Bus. Inf. Rev.*, vol. 29, no. 4, pp. 205-214, Dec. 2012.
- [8] J. Parenteau, R. L. Sallam, C. Howson, J. Tapadinhas, K. Schlegel, and T. W. Oestreich, "Magic Quadrant for Business Intelligence and Analytics Platforms." Gartner, Inc., 2016.
- [9] Universidad de Deusto, "Programa en Big Data y Business Intelligence, Formación Continua." Universidad de Deusto, Bilbao, 2015.
- [10] H. Chen, R. H. L. Chiang, and V. C. Storey, "Business Intelligence and Analytics: From Big Data To Big Impact," *Mis Q.*, vol. 36, no. 4, pp. 1165-1188, 2012.
- [11] A. Shukla and S. Dhir, "Tools for Data Visualization in Business Intelligence: Case Study Using the Tool Qlikview," 2016, pp. 319-326.
- [12] B. Kerschberg, "How Big Data and Business Intelligence are changing the manufacturing industry." Appirio, 2014.
- [13] E. Byrjnolfsson, J. Hammerbacher, and B. Stevens, "Competing Through Data: Three Experts Offer Their Game Plans." McKinsey Global Institute, 2011.
- [14] A. Rayon and R. Olveira, "El Big Data está permitiendo a las grandes empresas manipular el futuro" *Deia*, Bilbao, 2015.
- [15] J. Luftman and T. Ben-Zvi, "Key Issues for IT Executives 2009: Difficult Economy's Impact on IT," *MIS Q. Exec.*, vol. 9, no. 1, pp. 203-213, 2009.
- [16] E. Mazuin, M. Yusof, M. S. Othman, Y. Omar, and A. Rizal, "The Study on the Application of Business Intelligence in Manufacturing: A Review," *10*, vol. 10, no. 1, pp. 317-324, 2013.
- [17] N. Ur-Rahman, "Textual data mining for next generation intelligent decision making in industrial environment: a survey," *Eur. Sci. J.*, vol. 11, no. 24, pp. 1857-7881, 2015.
- [18] R. Fitriana and T. Djatna, "Progress in Business Intelligence System research : A literature Review," *Int. J. Basic Appl. Sci. IJBAS-IJENS*, vol. 11, no. 03, pp. 96-105, 2011.
- [19] R. Fitriana and T. Djatna, "Business Intelligence Design For Decision Support Dairy Agro industry Medium Scaled Enterprise," *Int. J. Eng. Technol. IJET - IJENS IJENS I J E N S*, vol. 12, no. 05, pp. 1-9, 2012.
- [20] A.-A. Rashid Al-Azmi, "Data, Text and Web Mining for Business Intelligence: A Survey," *Int. J. Data Min. Knowl. Manag. Process*, vol. 3, no. 2, pp. 1-21, 2013.
- [21] Y. Li, M. R. Kramer, A. J. M. Beulens, and J. G. A. J. van der Vorst, "A framework for early warning and proactive control systems in food supply chain networks," *Comput. Ind.*, vol. 61, no. 9, pp. 852-862, 2010.
- [22] F. van den Berg, C. B. Lyndgaard, K. M. Sørensen, and S. B. Engelsen, "Process Analytical Technology in the food industry," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 31, no. 1, pp. 27-35, 2013.
- [23] M. Lou Santovec, "Creativity, Innovation Are Keys to Future Success," *Women High. Educ.*, vol. 22, no. 4, pp. 21-21, Apr. 2013.

AGRADECIMIENTOS

Proyecto cofinanciado con fondos provenientes del Ministerio de Economía y Competitividad (código de proyecto PTQ-12-05653) y del Departamento de Educación, Política lingüística y Cultura del Gobierno Vasco (código de proyecto UE2016-10).

Un sistema de clasificación de olores en línea para narices electrónicas

An online odor classification system for electronic noses



■■■■ Juan-Álvaro Fernández-Muñoz¹, José-Luis Herrero-Agustín², Jesús Lozano-Rogado¹, José-Pedro Santos-Blanco³, José-Ignacio Suárez-Marcelo¹

Universidad de Extremadura. E.II.II. Dpto. Ing. Eléctrica, Electrónica y Automática¹ y Dpto. Ing. Sistemas Informáticos y Telemáticos². Avenida Elvas, s/n – 06006 Badajoz. Tfno: +34 924 289 600.

³ Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información. Centro Superior de Investigaciones Científicas. C/ Serrano, 144 – 28006 Madrid. Tfno: +34 91 561 88 06.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8075> | Recibido: 02/06/2016 • Aceptado: 27/10/2016

ABSTRACT

• The design of technical instrumentation based on biological principles, which are utilized by human perception senses to interact with the environment, has been a principal subject of research in several engineering disciplines for decades. However, only some of these artificial senses, such as machine vision, have comparatively reached a sufficient level of maturity so as to allow their regular use in nowadays industry. The challenge of artificially replicating the biological olfactory sense has resulted in the development of compact electronic systems commonly known as electronic noses or e-noses. These systems require, on the one hand, the use of specifically designed sensors for detecting odors, and secondly, the application of artificial intelligence software techniques for data processing and classification in a real-time basis. In this paper, a novel artificial olfaction system based on web services is introduced. The proposed system provides online odour data processing and recognition capabilities, regardless of e-nose location and built-in sensors, thus facilitating the design of smaller, generic or specific e-noses, which are suitable for use in connected IT environments.

• **Keywords:** electronic nose, multi-sensor system, pattern recognition, distributed systems, artificial intelligence, pollutant classification, Internet of things.

RESUMEN

El diseño de instrumentos basados en los mismos principios que los sentidos asociados a la percepción humana del entorno ha sido objeto de gran interés en investigación en diversas áreas de la ingeniería durante décadas. Comparativamente, sin embargo, solo algunos de estos sentidos, como la visión artificial, han alcanzado un nivel de madurez tal que permite hoy su uso habitual en la industria. El reto de replicar artificialmente el sentido olfativo biológico ha dado lugar a sistemas electrónicos compactos conocidos como narices electrónicas o e-noses, en inglés. Estos sistemas requieren, por un lado, el uso de sensores diseñados específicamente para detectar olores, y por otro, la aplicación de técnicas *software* de inteligencia artificial para el procesamiento de la información y la clasificación de los datos en tiempo real. En este trabajo se presenta un novedoso sistema de olfacción artificial basado en servicios *web*, que posibilita la conexión remota en línea de narices electrónicas para el envío de sus datos adquiridos, y la recepción de los resultados de clasificación de aromas de interés,

obtenidos mediante técnicas de reconocimiento de patrones sobre dichos datos, con mínimo retardo. El sistema es independiente de la ubicación del terminal detector y de sus sensores, lo que facilita el diseño de narices electrónicas más pequeñas, específicas o genéricas, aptas para su uso en entornos conectados inteligentes.

Palabras Clave: nariz electrónica, sistema de sensores, reconocimiento de patrones, sistemas distribuidos, inteligencia artificial, clasificación de contaminantes, Internet de las cosas.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los retos de ingeniería más importantes de las últimas décadas ha sido el de replicar artificialmente el sentido olfativo biológico mediante, por un lado, el desarrollo de novedosos tipos de sensores diseñados específicamente para detectar olores, y por otro, la aplicación de técnicas *software* de inteligencia artificial (IA) para el procesamiento de la información y la clasificación de datos dentro del paradigma de tiempo de respuesta mínimo [1]. En su acepción más ampliamente aceptada, una nariz electrónica (en inglés, *electronic nose* o *e-nose*) es un dispositivo que comprende un conjunto de sensores electroquímicos con sensibilidades parcialmente solapadas entre sí, y un sistema de reconocimiento de patrones apropiado, capaz de reconocer olores simples o complejos [2]. En la actualidad, los recientes avances en microelectrónica, sensores y procesamiento de señales han posibilitado la fabricación de narices electrónicas compactas, dotadas de una mayor capacidad de integración en plataformas portátiles o móviles, robotizadas e inteligentes, que pueden formar parte de escenarios interconectados en red como el Internet de las cosas [1,3].

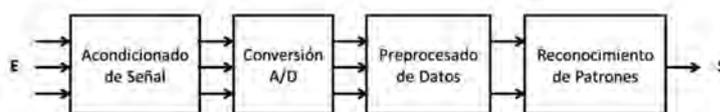


Fig. 1: Diagrama de bloques de una nariz electrónica

En la Fig. 1 se muestra la arquitectura típica de un sistema electrónico de identificación de olores. El proceso de identificación comienza recopilando las señales de salida de cada uno de los elementos de la matriz de sensores, que se producen a partir de un cambio de sus propiedades eléctricas al exponerse a una sustancia específica. De forma similar a los receptores olfativos biológicos, que son sensibles a múltiples olores, donde un mismo olor puede

ser detectado por diferentes receptores; un sensor químico responde de forma diferente a distintas sustancias, pudiendo operar en paralelo para cubrir todo un rango de sustancias de interés. El grado de selectividad de respuesta de la nariz depende, por tanto, en gran medida del tipo y número de sensores de entrada. Estas señales han de ser acondicionadas como paso previo a su digitalización, ya que es necesario operar con datos discretos fiables en la etapa de procesamiento. La etapa de preprocesado tiene como objetivo reducir la redundancia de los datos de entrada, para optimizar la respuesta del bloque de reconocimiento de patrones, cuya salida representa la clasificación del olor [1].

Las aplicaciones actuales de las narices electrónicas proporcionan servicios de clasificación de aromas y permiten detectar situaciones especiales en una notable diversidad de contextos prácticos, desde aplicaciones biomédicas y medioambientales, al control de calidad de productos farmacéuticos y el proceso de alimentos, entre otros. Sin embargo, los sistemas basados en narices electrónicas se diseñan habitualmente como aplicaciones independientes, no conectadas, incapaces de proporcionar servicios de compartición de resultados ni de peticiones remotas. Recientemente, varios autores [1,4] han mostrado un creciente interés en el uso de servidores *web* para compartir datos y proporcionar servicios de clasificación desde Internet. Sin embargo, la estructura *software* utilizada es de naturaleza cerrada.

El presente trabajo propone un enfoque de diseño para un sistema de olfacción artificial basado en servicios específicos *web* que permitan: (1) aceptar datos adquiridos por narices electrónicas con capacidad de conexión a red, (2) clasificar las sustancias de interés usando técnicas de IA para reconocimiento de patrones, y (3) proporcionar una aplicación *web* de altas prestaciones, capaz de generar resultados de clasificación de aromas en respuesta a peticiones de clasificación en línea, con mínimo retardo. El resto del artículo se ha estructurado como sigue: en la Sección 2 se presentan los detalles técnicos incorporados al sistema de olfacción artificial desarrollado, en especial su estructura y funcionalidad. En la Sección 3 se presentan los resultados de una prueba de validación de funcionamiento a la que ha sido sometido el sistema propuesto, para clasificar un grupo de contaminantes de interés en aplicaciones de control de la calidad del aire. Finalmente, en la Sección 4 se resumen las principales conclusiones derivadas de estos resultados.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. NARIZ ELECTRÓNICA PORTÁTIL

En el presente trabajo se ha utilizado una nariz electrónica portátil con capacidades de conectividad inalámbrica a redes Ethernet. La nariz electrónica WiNOSE ha sido la herramienta utilizada en diversos estudios de clasificación de aromas publicados en la última década [5,6]. Para este trabajo, se ha configurado un dispositivo WiNOSE 3.0 con sensores adecuados para las pruebas que se detallan más adelante en la Sección 3. El dispositivo de olfacción artificial WiNOSE puede describirse mediante cuatro bloques funcionales básicos o subsistemas: (1) extracción de aromas, (2) detección de aromas, (3) instrumentación y control y (4) acondicionamiento de señal.

2.1.1. Extracción de aromas

Se ha elegido la técnica del espacio de cabeza modificada para la extracción de olores desde viales de vidrio. Esta técnica consiste en aislar la muestra de agua en forma líquida en un recipien-

te herméticamente cerrado, en este caso un vial, de manera que los volátiles que son desprendidos por el agua residual queden conservados en la zona superior del recipiente, formando así una muestra gaseosa en equilibrio con el líquido, representativa del olor de la misma. Acto seguido, a través de unas aberturas para la entrada y salida del gas portador, se realiza el transporte de los volátiles desprendidos de la muestra hacia los sensores [3,7].

2.1.2. Sensores

La nariz electrónica WiNOSE 3.0 admite hasta 4 microsensores de diversos tipos integrados como *array* de entrada. Se han fabricado celdas a medida en Al para alojar diferentes tipos de *arrays* de sensores. Para las pruebas detalladas en la Sección 3, se han elegido cuatro sensores comerciales de película de SnO₂ (SGX Sensortech modelos MiCS-5524 (x2), MiCS-5526 y MiCS-5914), suspendidos sobre estructuras micromecanizadas de Si, que incorporan una resistencia calefactora y contactos para medir la resistencia de la película sensible. Cada sensor puede operar a una temperatura distinta, hasta un máximo de 500 °C, con un consumo inferior a 100 mW. En la Fig. 2 se muestran los sensores ya integrados en parejas, junto a una de las celdas de Al. Cada celda está conectada a una electroválvula de tres vías (SMC S70) que permite seleccionar entre dos entradas, una para medida de la muestra, y otra para un gas de referencia, dotándose esta última de un filtro de carbón activo para evitar impurezas. El sistema se completa con sendos sensores de humedad relativa y temperatura (Sensirion SHT15), una microbomba (Rietschle Thomas 2002) y un caudalímetro (SMC PFMV5).

2.1.3. Instrumentación y control

El dispositivo se gobierna mediante un microcontrolador digital de señales (DSC) Microchip DSPIC33FJ128GP306, con 16 kB de RAM y 128 kB de memoria FLASH. Posee cuatro conversores A/D para la medida de los sensores y cinco salidas con modulación PWM para la calefacción de los sensores y el control de la microbomba. Dispone de controlador WiFi y pantalla LCD táctil, que permite visualizar los principales parámetros de medida en modo histórico, así como modificar diferentes parámetros de configuración (p. e. potencia de bombeo y temperatura de sensor). La



Fig. 2: Montaje en placa de dos sensores SGX Sensortech MiCS-5524, junto a celda de Al fabricada a medida

nariz se alimenta con 3 baterías recargables de 4500 mA/h que proporcionan 8 horas de autonomía.

2.1.4. Acondicionado de señal

En todo sistema olfativo artificial, debido a perturbaciones inevitables al método de medida, es necesario utilizar técnicas de procesamiento de datos y señales para mejorar la robustez de la medida [3]. El objetivo fundamental del acondicionado de señal es mejorar el rendimiento de los bloques posteriores de la Fig. 1, responsables de la identificación de las muestras de entrada. Los datos de los sensores se manipulan para obtener parámetros descriptivos de la respuesta de la matriz de sensores que optimicen la selectividad de las técnicas de reconocimiento [8]. Generalmente, en esta fase se llevan a cabo tres pasos básicos: (1) manipulación de la medida de entrada o base, que compensa las derivas de los sensores de entrada, (2) compresión, que extrae información de la respuesta transitoria de cada sensor, y (3) normalización, que prepara un vector de características homogéneas adecuado para el preprocesado de datos (véase Fig. 1).

2.2. RECONOCIMIENTO DE PATRONES

2.2.1. Preprocesado de Datos

Los datos provenientes de la nariz electrónica poseen un alto grado de redundancia debido, por una parte, a la sensibilidad cruzada de los sensores de gas, y también a la elevada dimensionalidad de los datos acondicionados del *array* de entrada. El preprocesado de datos busca reducir la dimensionalidad, con el fin de obtener un conjunto de valores numéricos (o vector característico) asociado a cada aroma lo más compacto posible, con miras a su posterior clasificación e identificación. Las herramientas matemáticas más habitualmente utilizadas en este bloque son el Análisis de Componentes Principales (PCA, del inglés *Principal Component Analysis*) y el Análisis Discriminante Lineal (LDA, del inglés *Linear Discriminant Analysis*).

El algoritmo PCA, de naturaleza no supervisada, define una transformación lineal del sistema de coordenadas de entrada en otro que permite categorizar en cada dimensión las varianzas relativas del conjunto de datos de forma ordenada. Como resultado, se determinan los componentes principales de la distribución como aquellas dimensiones asociadas a varianzas más significativas. La reducción de dimensionalidad se obtiene descartando aquellos componentes principales de menor varianza [9]. El objetivo del algoritmo LDA es encontrar las líneas de separación que mejor permiten separar clases entre sí, con conocimiento *a priori* de dichas clases. LDA proporciona resultados óptimos cuando las variables son de naturaleza Gaussiana. Es posible, en principio, que una componente principal de menor importancia sea la más discriminante para una pareja de clases, pero también es habitual que las distribuciones de entrada no sean Gaussianas. Por esta razón, ambas técnicas se consideran complementarias en la literatura [10].

2.2.2. Técnicas para Reconocimiento de Patrones

El objetivo del reconocimiento de patrones es clasificar o etiquetar de forma automática la clase o etiqueta asociada a cada vector de entrada obtenido a la salida del bloque de preprocesado. Para lograr una correcta identificación de las muestras, es necesario llevar a cabo un proceso de aprendizaje supervisado, según el cual una técnica concreta ajustará los parámetros necesarios para optimizar la tasa de éxito de clasificación (TE) de las muestras de aprendizaje, con la intención de utilizar dichos parámetros para clasificar muestras futuras. En este trabajo se ha dotado a este

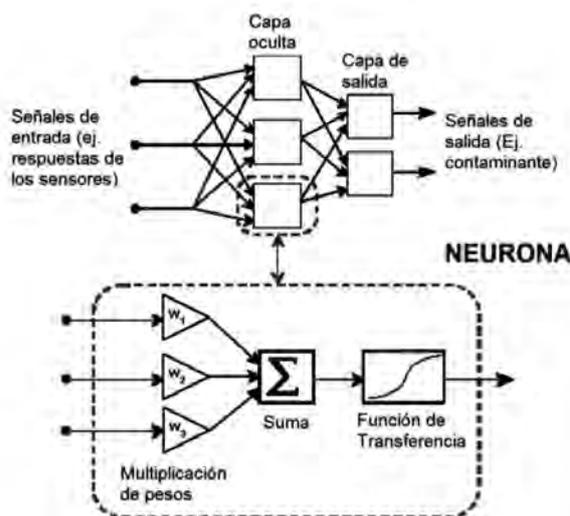


Fig. 3: Estructura de un perceptrón de 3 capas: entrada (3 neuronas), oculta (3 neuronas) y salida (2 neuronas)

bloque con dos técnicas de clasificación diferentes: (1) perceptrón multicapa sin realimentación, y (2) clasificador borroso.

El perceptrón multicapa es un tipo de red neuronal artificial (RNA) dotado de una red homogénea de procesadores idénticos o neuronas, organizados en varios planos o capas, con interconectividad completa entre cada neurona de una capa y las neuronas de la capa inmediatamente anterior, aplicando una suma ponderada de todas las conexiones, y una función logística o de saturación a la salida. En la Fig. 3 se muestra la estructura del perceptrón más simple, que contiene tres capas: entrada, oculta y salida. Las capas de entrada y salida tienen dimensión fija, según el número de elementos del vector de entrada y de etiquetas a clasificar, respectivamente. Solo la capa oculta permite un ajuste tanto del número de neuronas como del valor de los pesos. El algoritmo de propagación hacia atrás (en inglés, *backpropagation*), con diferencia el más utilizado en este tipo de RNA, realiza el ajuste de los pesos en dos fases. En la primera, se introduce un vector en la capa de entrada y se calcula el valor de cada capa hacia delante hasta la salida. En la segunda, se modifican los pesos capa a capa, hacia atrás, para ajustar la salida al valor deseado [11].

La segunda técnica de clasificación considerada es un clasificador de lógica borrosa (FL, del inglés *Fuzzy Logic*). FL es una extensión de la lógica clásica que permite definir un grado de pertenencia parcial para cada elemento de un conjunto [12]. La clasificación borrosa se basa en la definición de funciones de pertenencia adecuadas a vectores de entrada y clases o etiquetas de salida. La clasificación se formula mediante reglas lógicas que combinan con operadores AND las funciones de pertenencia de los elementos del vector de entrada para cada clase de salida. Para un vector de entrada, el clasificador identifica la clase de salida como aquella asociada a la regla lógica con grado de pertenencia máximo. El aprendizaje FL requiere de métodos para la definición de las funciones de pertenencia individuales y para la selección de variables a utilizar en cada regla. En este trabajo se utiliza un método basado en el proceso de ajuste de parámetros de otro tipo de RNA llamado de base radial. De estructura similar al perceptrón, aunque con un número de neuronas y capas determinado, estas redes incorporan una función de salida neuronal de base radial (RBF, del inglés *radial basis function*), típicamente una función Gaussiana, siendo su método de ajuste del tipo no supervisado [11]. El clasificador FL propuesto utiliza un método similar para obtener las funciones de pertenencia, siendo todas Gaussianas ajustadas a la

estadística de los vectores de entrada para cada clase, como en una RNA RBF. El ajuste final del número de variables de cada regla se realiza mediante un algoritmo de búsqueda secuencial simple, que optimiza la selectividad borrosa de cada regla respecto al resto de reglas para el conjunto de muestras de aprendizaje.

2.3. PLATAFORMA DE SERVICIOS DE OLFACCIÓN WEB

2.3.1. Metodología de diseño

Para el presente trabajo se ha desarrollado una novedosa plataforma *web* que permite adquirir los datos extraídos de narices electrónicas antes del bloque de preprocesamiento (véase Fig. 1). Es decir, el sistema *web* aglutina la parte del sistema de olfacción artificial clásico dedicada al procesamiento digital de los datos de entrada, permitiendo de forma transparente utilizar sus módulos de reconocimiento independientemente de la nariz utilizada y de las muestras de entrada. El objetivo fundamental de esta plataforma es proporcionar un alto grado de accesibilidad para poder utilizar tanto los datos procesados como los servicios ofrecidos. Además, esta propuesta proporciona una aplicación rápida y fácil de usar, con pocos requisitos, accesible de forma remota y disponible a través de cualquier dispositivo con capacidad de conexión a servicios *web*, p. e. microsensores conectables a red, tabletas o *smartphones*.

De acuerdo con los dos tipos de clasificación de muestras considerados en la Sección 2.2.2, se propone una metodología de diseño de la plataforma *web* que permita la construcción flexible de aplicaciones de detección de aromas (véase Fig. 4). Esta metodología se basa en la definición de diferentes niveles en los que se desarrolla cada una de las partes de la plataforma. La metodología se divide en dos secciones independientes: red neuronal y modelo borroso. El objetivo del primer nivel es obtener un conjunto de datos iniciales que permitan la construcción de los modelos de

clasificación. Para la construcción de la red neuronal, la información recibida de la nariz electrónica se transforma en parejas E/S etiquetadas tras una evaluación de datos con objeto de reducir la dimensionalidad. Para construir el modelo borroso, se determina un conjunto de reglas ajustadas al tipo de datos de E/S mediante el procedimiento descrito en la Sección 2.2.2. El siguiente nivel contiene los algoritmos que permiten el ajuste de cada modelo a las parejas de E/S seleccionadas en cada caso. El resultado de ambas aproximaciones son dos modelos (red neuronal y modelo borroso) que posibilitan la clasificación genérica de los datos de entrada en las clases seleccionadas en el nivel anterior.

El nivel de servicios *web* conecta el sistema desarrollado tanto con los usuarios como con las aplicaciones externas que solicitan resultados de clasificación de aromas. Para proporcionar un acceso remoto al sistema, la plataforma desarrollada utiliza servicios RESTful, basados en la arquitectura REST (del inglés *REpresentational State Transfer*). RESTful es actualmente la tecnología más relevante en el desarrollo de servicios *web* y móviles. Si el propósito de un servicio es proporcionar una ventana a sus clientes para que puedan acceder a los recursos, el diseñador del servicio busca que sea fácil de implementar, mantener, extender y ampliar. Los servicios RESTful logran estos objetivos mediante el uso de un conjunto reducido de primitivas del protocolo de aplicación HTTP, como GET, POST, PUT y DELETE [13]. Por último, el nivel de componentes *web* define una aplicación con un alto grado de eficiencia que soporta peticiones a través de Internet y permite a los usuarios conectarse con cada uno de los diferentes servicios ofrecidos por la plataforma de forma transparente e independiente del dispositivo.

2.3.2. Implementación

Siguiendo la metodología descrita en la Sección 2.3.1, se ha desarrollado una novedosa plataforma de servicios *web* para la

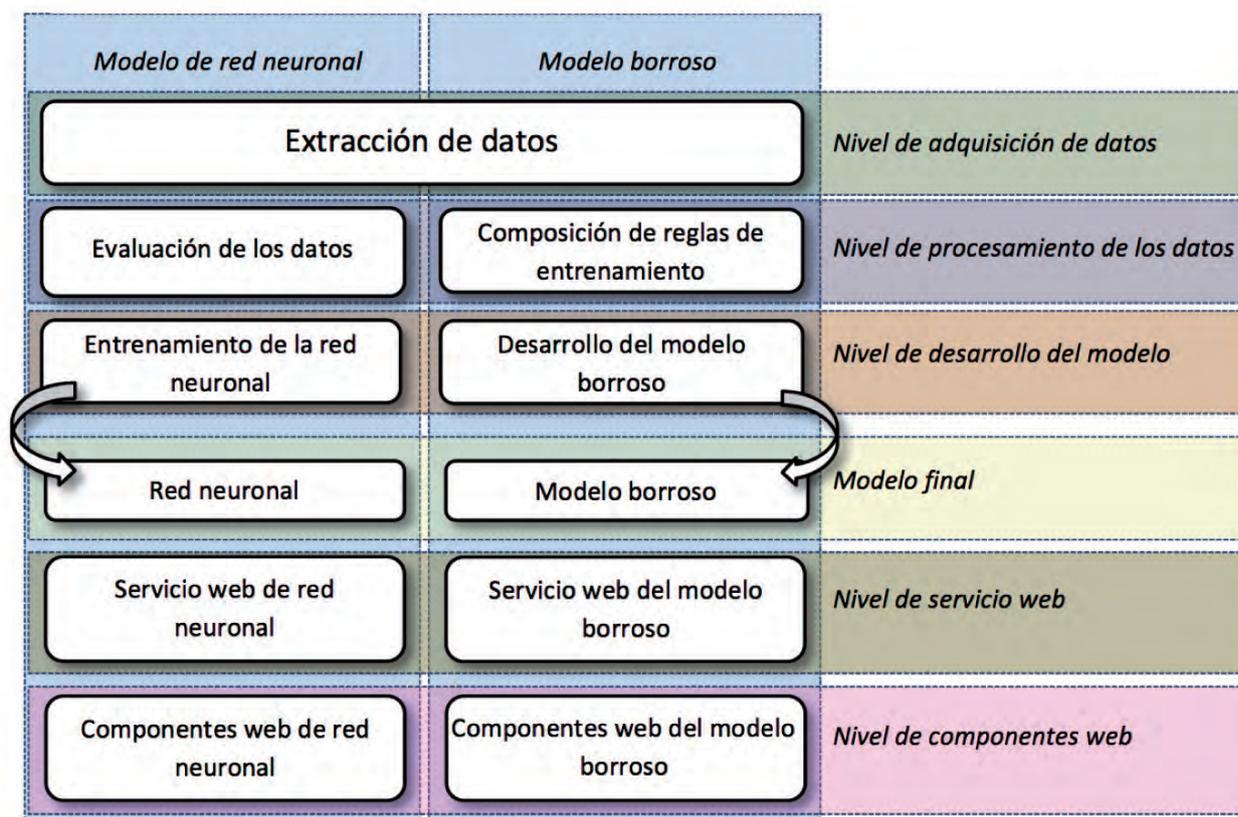


Fig. 4: Estructura software del servidor web para clasificación de aromas

clasificación genérica de aromas en línea, en la que se integran las siguientes tecnologías *software* de alta eficiencia:

- Servicios *web* RESTful, que proporcionan un mecanismo de conexión rápido y simple.
- AJAX (del inglés *Asynchronous JavaScript and XML*), tecnología que combina XML y JavaScript para desarrollar clientes de servicios *web* ejecutables en el navegador, permitiendo el diseño por hilos de ejecución en paralelo para que el flujo asíncrono de peticiones de cliente y respuestas del servidor no afecte a otros procesos durante la espera.
- Aplicaciones RIA (del inglés *Rich Internet Applications*), aplicaciones *web* que optimizan el control del flujo de datos cliente/servidor para reducir el tiempo de espera entre peticiones y respuestas, y en las que la gestión del interfaz se localiza en el lado cliente, mientras que la manipulación de datos y otras operaciones complejas se implementan en el lado servidor.
- Arquitectura de diseño de plataforma basada en componentes *web* (PCW, del inglés *Platform Component Web*), que proporciona una infraestructura adecuada para la construcción de aplicaciones *web* de alto rendimiento.

En la Fig. 5 se ilustra la estructura de la plataforma de servicios *web* desarrollada junto a los diferentes niveles de diseño inte-

grados en la misma. La capa de adquisición de datos implementa el nivel de adquisición de datos definido en la metodología, que además incluye los algoritmos necesarios para extraer información de dispositivos de nariz electrónica y almacenar sus datos en formato recuperable por consulta, p. e. base de datos SQL. La capa de clasificación de datos está relacionada con aquellos niveles que gestionan las técnicas de clasificación, mientras que los servicios *web* RESTful permiten conectar el sistema con usuarios externos a nivel de aplicación *web*. Finalmente, las capas de interfaz de usuario y la plataforma de componentes *web* se combinan para ofrecer una aplicación *web* que permita la clasificación de los aromas de entrada.

El diseño mediante componentes facilita la construcción robusta de aplicaciones *web* complejas y con modularidad escalable. Un componente *software* es una unidad de composición que puede desarrollarse de manera aislada, y que puede estar compuesto por otros componentes aislados para formar aplicaciones complejas jerarquizadas. Basada en este concepto de diseño, la PCW propuesta en este trabajo permite construir una aplicación *web* mediante la composición de componentes desarrollados específicamente para ser activados en un navegador *web*, es decir, integra también desde su metodología por niveles los elementos necesarios para el desarrollo y uso de aplicaciones *web* robustas. La PCW propuesta se divide en dos secciones: cliente y servidor. En la sección del cliente se integran varias entidades que permiten

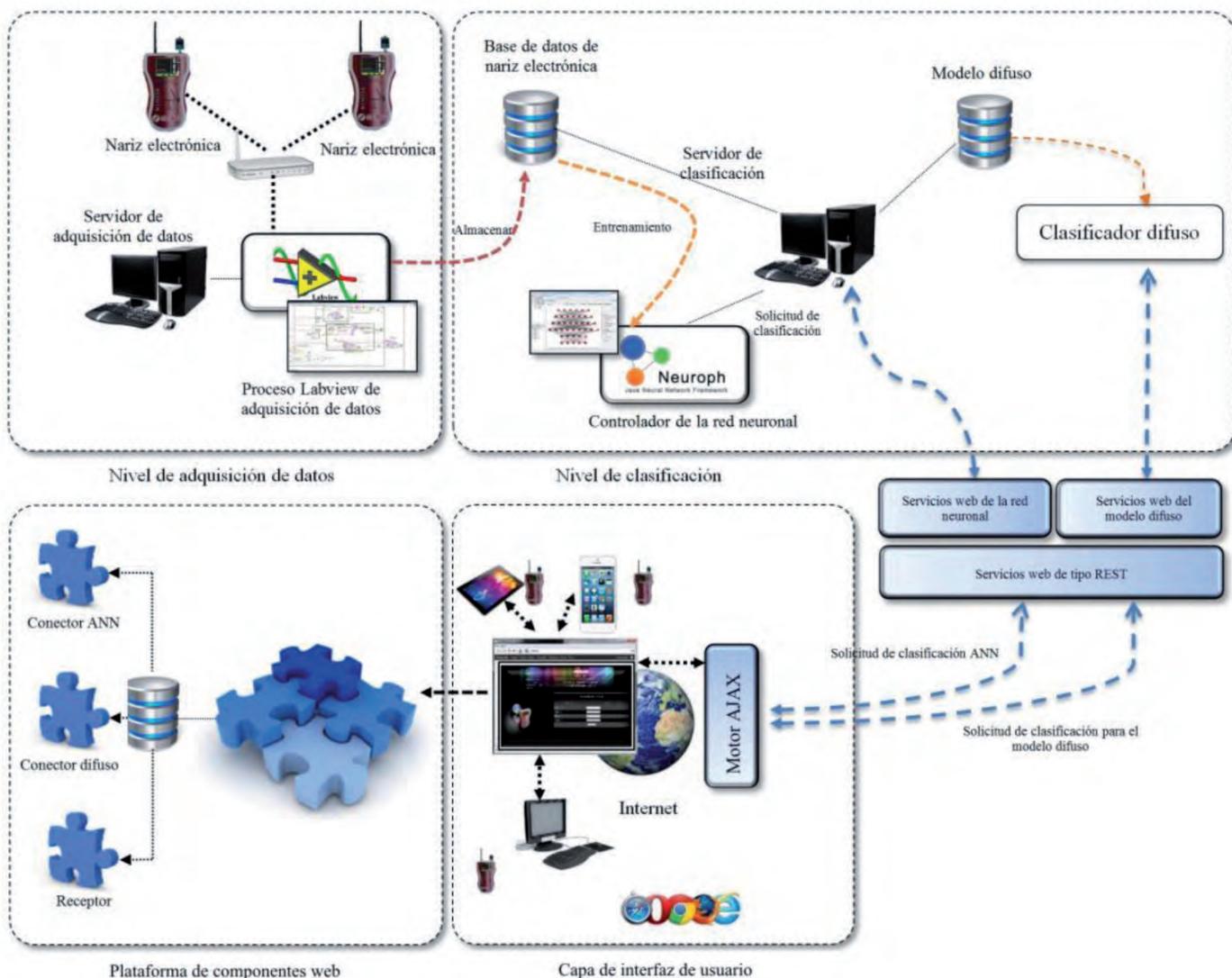


Fig. 5: Plataforma web para olfacción artificial de aromas en línea

ENTRADA \ SALIDA	Agua		Acetona		Tolueno		Amoníaco		Formaldehído		Peróxido de Hidrógeno		Etanol		Benceno		Diclorometano		Ácido acético		Xileno		Dimetil-acetamida				
	18	17	18	18	18	18	17	17	18	18	18	18	16	18	14	18	1	17	18	17	18	1	17	17	16	17	
Agua																											
Acetona																											
Tolueno																											
Amoníaco																											
Formaldehído																											
Peróxido de Hidrógeno																											
Etanol																											
Benceno																											
Diclorometano																											
Ácido acético																											
Xileno																											
Dimetil-acetamida																											

Fig. 6: Matriz de confusión para experimento de detección de 12 contaminantes en disolución con 216 muestras

manipular componentes, incorporar mecanismos de rendimiento y activar protocolos de comunicación, mientras que la sección del servidor proporciona un elemento intermedio (*proxy*) para establecer la comunicación con el exterior. De esta manera, el beneficio logrado es doble: por un lado, se proporcionan nuevas capacidades para gestionar y controlar la descarga y activación de aquellos componentes *web* que componen la aplicación y, en segundo lugar, se permite al usuario conectar con los recursos externos necesarios a través de servicios *web* RESTful.

3. RESULTADOS

La plataforma de servicios de olfacción *web* detallada en la Sección 2.3 ha sido probada como proveedora de servicios de clasificación para una nariz electrónica WiNOSE 3.0 inalámbrica portátil (véase Sección 2.1). El objetivo de la prueba ha sido demostrar la capacidad del sistema para, partiendo desde cero, realizar las fases de aprendizaje de los dos métodos de clasificación y reconocimiento de patrones incorporados como componentes de la plataforma, RNA multicapa y clasificador FL basado en reglas, y después identificar un conjunto de muestras con un total de 12 sustancias contaminantes de interés en aplicaciones de control de la calidad del aire.

Conforme a las especificaciones de la Sección 2.3.2, la aplicación *web* desarrollada para el lado del cliente se compone de dos elementos: núcleo y componente de comunicaciones. El primero proporciona operaciones básicas para descargar e integrar los componentes en la aplicación *web*, mientras que el segundo especifica los protocolos de comunicación necesarios para efectuar la conexión de la aplicación con los servicios externos. La conexión entre la aplicación y un servicio externo se establece mediante un componente llamado conector. En este caso, se han definido dos tipos de conectores: conector RNA y conector FL, que enlazan a la aplicación con servicios específicos relacionados con el modelo de red neuronal y el modelo borroso, respectivamente. Tras la corres-

pondiente fase de aprendizaje, requerida para adaptar la respuesta del servicio a los vectores de datos enviados por el cliente, el conector habilita al cliente la opción de efectuar consultas.

Para la aplicación de prueba, las consultas del cliente contienen 5 datos numéricos: 1 para indicar el tipo de método de clasificación requerido, y otros 4 correspondientes a los valores obtenidos del *array* de entrada de la nariz electrónica tras el bloque de acondicionamiento (véase Sección 2.1). Según el tipo de clasificación elegida, se descargan y activan automáticamente los componentes *web* correspondientes. Una vez solicitada desde el cliente la clasificación de un contaminante, el componente receptor recibe la información devuelta por la solicitud de clasificación, analiza los datos y extrae cada atributo, mientras que el componente de almacén de datos guarda esta información y proporciona una interfaz *web* adecuada que permite suministrar al usuario la respuesta a la consulta.

La plataforma ha sido probada con un total de 216 muestras correspondientes a 18 medidas de 12 compuestos diferentes, consistiendo 11 de ellos en disoluciones al 5% de diversas sustancias contaminantes, siendo el compuesto restante agua destilada. Para el modelo RNA, se utilizó una estructura con 1 capa oculta ajustada a 15 neuronas, mientras que para el modelo borroso, que consta de 12 reglas FL, se realizó una búsqueda para elegir el mejor conjunto de reglas en la fase de aprendizaje, obteniendo un conjunto de reglas optimizado donde 6 de ellas se basan solamente en la información de 1 sensor, y las otras 6 reglas en la información de 2 sensores cada una. El modelo borroso optimizado requiere el uso de los 4 sensores de entrada para poder discernir entre las 12 sustancias.

Para comparar los resultados de clasificación obtenidos mediante los dos métodos de reconocimiento de patrones implementados, es necesario establecer un método de validación adecuado. En este caso, debido a la reducida cantidad de medidas realizadas para cada sustancia objetivo, el método de validación cruzada dejando uno fuera (LOOCV, del inglés *Leave One Out Cross Validation*)

resulta ser el más apropiado. Este método, computacionalmente costoso, implica separar los datos de forma que se utilice una sola vez cada muestra como dato de prueba, mientras que todas las demás sirven para conformar los datos de entrenamiento. El proceso se repite para todas las muestras, almacenando en una matriz o tabla los resultados de clasificación acumulados para cada muestra. Esta tabla se denomina de contingencia o error, o también matriz de confusión, y permite comparar fácilmente el rendimiento de un grupo de técnicas sobre el mismo conjunto de muestras.

La Fig. 6 recoge en forma de matriz de confusión combinada los resultados obtenidos en este experimento mediante el uso de las dos técnicas de reconocimiento de patrones incorporadas a la plataforma: RNA y clasificador borroso. El par de valores recogido en cada elemento de la matriz indica el número de ocasiones que la sustancia de entrada (fila) ha sido clasificada como la sustancia de salida (columna). El par recoge dos valores, el primero para la técnica RNA, y el segundo para el clasificador FL. Como puede observarse, la tasa de éxito en la clasificación supera el 94% en el detector RNA, y el 98% en el modelo borroso. Por tanto, ambos modelos pueden considerarse adecuados para la tarea de reconocimiento de patrones planteada.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha presentado una novedosa plataforma para el desarrollo de sistemas de olfacción artificial basados en servicios *web* de alto rendimiento. La utilización de servicios *web* en este tipo de sistemas permite desarrollar en paralelo dos partes bien diferenciadas: (1) el instrumento de medida, que debe alojar los sensores, los circuitos de acondicionamiento y un microprocesador para el control del dispositivo y la gestión de comunicaciones, incluyendo un cliente *web* capaz de generar solicitudes y procesar respuestas, y (2) el servidor de aplicaciones *web*, encargado de gestionar las peticiones de uno o más instrumentos de medida, ejecutar consultas, entrenar modelos de reconocimiento, realizar procesos de validación y gestionar y almacenar históricos.

Al reducir los requisitos del instrumento de medida, se permite optimizar su diseño y reducir su tamaño físico, peso y consumo eléctrico, así como los costes de fabricación. Junto al uso de modernos microsensores y microactuadores, estos nuevos tipos de narices electrónicas compactas pueden explotar su capacidad de integración en plataformas portátiles o móviles, robotizadas e inteligentes, con interconexión en red, aproximándose de forma definitiva al modelo de sensores utilizado en el Internet de las cosas. La medida de la contaminación y caracterización de aromas en un entorno de múltiples sensores portátiles interconectados es un concepto en desarrollo actualmente, que solo puede llevarse a cabo con el uso de instrumentos de medida de bajo coste, conectados a plataformas de servicios de olfacción de acceso remoto. Además, la portabilidad del equipo de medida permite obtener mediciones continuas en zonas de difícil acceso, almacenarlas en memoria, y conectarse a un servidor para el volcado de datos y su posterior tratamiento.

El experimento propuesto para la validación del sistema de olfacción artificial basado en servicios *web* se ha dirigido al contexto de la detección de sustancias contaminantes, de gran relevancia práctica. El hecho de disponer de un número reducido de medidas para cada sustancia simula una situación habitual en narices portátiles en entornos no controlados o de rápida evolución, donde a menudo solo puede realizarse un reducido grupo de medidas en un pequeño intervalo de tiempo. La posibilidad de elección *in situ* de modelos de reconocimiento para un entrenamiento rápi-

do es un valor añadido del sistema desarrollado. En este sentido, puede afirmarse que el experimento de identificación de contaminantes ha permitido validar: (1) el número y tipo de sensores utilizados, (2) el acondicionamiento de señal y *hardware* de control de la nariz electrónica inalámbrica de prueba, (3) los métodos de reconocimiento de patrones propuestos, que constan de métodos de aprendizaje supervisado y no supervisado, y (4) la metodología de diseño de la plataforma *web* y la estructura *software* basada en componentes para la construcción de los servicios *web*.

Finalmente, la estructura modular de la plataforma y su metodología de diseño permiten incorporar con facilidad nuevos servicios futuros sin menoscabar los ya existentes. Actualmente, se está planificando un nuevo conjunto de experimentos con sensores y narices electrónicas inalámbricas de bajo coste, que pretende incluir algoritmos de preprocesado de datos, no incorporados aún en la plataforma, como PCA y LDA. Se espera que estos experimentos continúen proporcionando datos de interés para la comunidad científica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Loutfi A, Coradeschi S. "Odor recognition for intelligent systems". IEEE Intelligent Systems. 2008. Vol.23-1 p.41-48. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MIS.2008.11>
- [2] Persaud KC, Dodd GH. "Analysis of discrimination mechanisms of the mammalian olfactory system using a model nose". Nature. 1982. Vol. 299 p.352-355. DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/299352a0>
- [3] Gardner JW, Bartlett PN. Electronic noses: principles and applications. Oxford University Press. Oxford, Reino Unido. 1999. ISBN: 978-0198559559.
- [4] Ma XY, Liu YX. "Investigation of alcohol identification based on electronic olfactory system". En: Chou T (ed). Remote sensing and smart city. WIT Press. Southampton, Reino Unido. 2015. p.121-130. ISBN: 978-1784660291.
- [5] Santos JP, Aleixandre M, Cruz C. "Hand held electronic nose for VOC detection". Chemical Engineering Transactions. 2012. Vol.30 p.181-186. DOI: <http://dx.doi.org/10.3303/CET1230031>
- [6] Santos JP, Aleixandre M, Horrillo MC. "WiNOSE: wireless electronic nose for outdoors applications". Chemical Engineering Transactions. 2010. Vol.23 p.159-164. DOI: <http://dx.doi.org/10.3303/CET1023027>
- [7] Lozano J, Santos JP, Horrillo MC. "Wine applications with electronic noses". En: Preedy V, Rodríguez ML (eds). Electronic noses and tongues in food science. Academic Press. Londres, Reino Unido. 2016. p.137-148. ISBN: 978-0131249912.
- [8] Gutiérrez-Osuna, R. "Pattern analysis for machine olfaction: a review". IEEE Sensors Journal. 2002. Vol.2-3 p.189-202. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2002.800688>
- [9] Jolliffe IT. Principal component analysis. 2ª ed. Springer. Nueva York, EE.UU. 2002. ISBN: 978-0387954424.
- [10] Martínez AM, Kak AC. "PCA versus LDA". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2001. Vol.23-2 p.228-233. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/34.908974>
- [11] Haykin SO. Neural networks and learning machines. 3ª ed. Pearson. Upper Saddle River, EE.UU. 2009. ISBN: 978-0131471399.
- [12] Kosko B. Fuzzy engineering. Prentice Hall, Upper Saddle River, EE.UU. 1997. ISBN: 978-0131249912.
- [13] Richardson L, Ruby S. RESTful web services. O'Reilly. Sebastopol, EE.UU. 2007. ISBN: 978-0596529260.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido realizado gracias al apoyo del Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto TEMINAIR (TEC2013-48147-C6-5-R).

- 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 (mword), .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 29,85 €/año

Reciba la revista dyna impresa en su domicilio por solo 29,85 €/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, Bizkaia y Galicia.

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.

 **MEWA**
TEXTIL-MANAGEMENT

El paño de limpieza más
resistente del mercado.

NOSOTROS NOS ENCARGAMOS



El sistema de paños de
limpieza en vídeo

www.mewa.es